

| | |
|-------------|---|
| Title | 舗装技術の継続的改善に向けた維持管理に関する方法論的研究(Dissertation_全文) |
| Author(s) | 藤原, 栄吾 |
| Citation | Kyoto University (京都大学) |
| Issue Date | 2012-09-24 |
| URL | http://dx.doi.org/10.14989/doctor.k17139 |
| Right | |
| Type | Thesis or Dissertation |
| Textversion | author |

舗装技術の継続的改善に向けた
維持管理に関する方法論的研究

2012年

藤原 栄吾

目次

| | |
|-------------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.1.1 序文 | 1 |
| 1.1.2 舗装の維持管理の技術基準とこれにかかる業務 | 2 |
| 1.1.3 舗装の維持管理における課題 | 6 |
| 1.2 研究目的 | 8 |
| 1.2.1 日常的な補修箇所の耐久性向上 | 8 |
| 1.2.2 舗装の構造的な損傷箇所の抽出 | 8 |
| 1.2.3 修繕に用いる望ましい舗装材料の選択 | 9 |
| 1.2.4 社会実験的な試験施工による舗装材料の継続的改善 | 9 |
| 1.3 本研究の構成 | 10 |
| 第2章 舗装マネジメントの現況と課題 | 13 |
| 2.1 総説 | 13 |
| 2.2 舗装の性能の評価法 | 13 |
| 2.2.1 路面の評価 | 13 |
| 2.2.2 舗装の構造評価 | 17 |
| 2.3 アセットマネジメント手法の導入 | 18 |
| 2.3.1 アセットマネジメントの定義と特徴 | 18 |
| 2.3.2 舗装マネジメントシステムの発展と背景 | 20 |
| 2.3.3 ネットワークレベルとプロジェクトレベルの活動 | 22 |
| 2.3.4 舗装マネジメントシステムの運用にかかる問題 | 22 |
| 2.3.5 ISO5500X との関係 | 25 |
| 2.4 舗装技術の継続的な改善 | 28 |
| 2.4.1 継続的な改善の必要性 | 28 |
| 2.4.2 不完全な情報を活用した舗装技術の継続的な改善 | 28 |

| | | |
|------------|-----------------------------------|-----------|
| 第3章 | 日常的な維持に用いる補修用常温混合物の耐久性評価 | 31 |
| 3.1 | 総説 | 31 |
| 3.2 | 常温アスファルト混合物の室内試験 | 32 |
| 3.2.1 | 常温アスファルト混合物の特徴と用途 | 32 |
| 3.2.2 | 室内試験の目的と試験項目 | 33 |
| 3.2.3 | 室内試験の温度条件の設定 | 36 |
| 3.2.4 | 室内試験の事例 | 37 |
| 3.2.5 | 室内試験の考察 | 42 |
| 3.2.6 | 室内試験と現地調査による実証分析の関係 | 44 |
| 3.3 | ワイブル劣化ハザードモデルを用いたポットホール補修箇所の耐久性評価 | 45 |
| 3.3.1 | ポットホールの発生と補修 | 45 |
| 3.3.2 | ポットホール再発生しやすさへのワイブル劣化ハザードモデルの適用 | 48 |
| 3.3.3 | 実証分析 | 52 |
| 3.3.4 | 実証分析の考察 | 63 |
| 3.4 | 本章の考察 | 66 |
| 第4章 | 舗装構造の改善に向けた舗装の劣化予測と異質性評価 | 69 |
| 4.1 | 総説 | 69 |
| 4.2 | 基本的な考え方 | 70 |
| 4.2.1 | 従来の研究との関係 | 70 |
| 4.2.2 | 構造調査の効率化の必要性 | 71 |
| 4.2.3 | ベンチマーキングと異質性 | 71 |
| 4.3 | 劣化速度の異質性を考慮した舗装劣化モデル | 73 |
| 4.3.1 | モデル化の前提条件 | 73 |
| 4.3.2 | 混合マルコフ劣化ハザードモデル | 74 |
| 4.3.3 | 混合マルコフ劣化ハザードモデルの推計 | 77 |
| 4.3.4 | 異質性パラメータの推計 | 78 |
| 4.4 | ベンチマーキングと評価 | 79 |
| 4.4.1 | 重点管理箇所の抽出と構造診断のプロセス | 79 |
| 4.4.2 | 基準パフォーマンスカーブの導出 | 80 |
| 4.4.3 | 相対評価と重点管理区間の抽出 | 81 |

| | | |
|--------------|--------------------------------------|------------|
| 4.4.4 | たわみ量調査による舗装構造診断 | 82 |
| 4.5 | 積雪地域の国道における劣化速度の異質性評価の実証分析 | 84 |
| 4.5.1 | 概要 | 84 |
| 4.5.2 | 推計結果 | 85 |
| 4.5.3 | 劣化速度の相対評価と重点管理区間の選定 | 87 |
| 4.5.4 | FWD による舗装の構造評価 | 90 |
| 4.6 | 本章の考察 | 95 |
| 第 5 章 | 修繕に用いる望ましい舗装材料の選択 | 97 |
| 5.1 | 総説 | 97 |
| 5.2 | 基本的な考え方 | 97 |
| 5.2.1 | 修繕に用いる材料の選択メカニズム | 97 |
| 5.2.2 | 欠測の弊害 | 99 |
| 5.2.3 | 選択バイアスの処理法 | 101 |
| 5.2.4 | 望ましい舗装材料とその選択の考え方 | 101 |
| 5.3 | 舗装材料選択モデル | 102 |
| 5.3.1 | 生存確率の推定 | 102 |
| 5.3.2 | 舗装材料選択モデル | 103 |
| 5.4 | 選択モデルの適用事例 | 104 |
| 5.4.1 | 概要 | 104 |
| 5.4.2 | ハザードモデルの推計結果 | 106 |
| 5.4.3 | 選択モデルの適用結果 | 107 |
| 5.5 | 本章の考察 | 109 |
| 第 6 章 | 社会実験的なアプローチによる舗装材料の継続的改善 | 113 |
| 6.1 | 総説 | 113 |
| 6.2 | 基本的な考え方 | 114 |
| 6.2.1 | 舗装材料の継続的改善の方針 | 114 |
| 6.2.2 | 舗装材料の継続的な改善のための必要事項 | 114 |
| 6.3 | 舗装技術の継続的改善に向けた実証分析 | 117 |
| 6.3.1 | 対象地域における舗装維持管理の現況と課題 | 117 |

| | | |
|------------|--------------------------------|------------|
| 6.3.2 | 耐久性向上に寄与する新しい舗装材料の提案 | 118 |
| 6.4 | 社会実験的アプローチによる試験施工 | 120 |
| 6.4.1 | 修繕工法と既存の望ましい材料の選定 | 120 |
| 6.4.2 | 試験施工候補区間の選定と事前調査 | 121 |
| 6.4.3 | 試験施工の概要 | 122 |
| 6.4.4 | 追跡調査 | 123 |
| 6.5 | 本章の考察 | 128 |
| 第7章 | 結論 | 129 |
| 7.1 | 各章の結論 | 129 |
| 7.2 | 結語 | 132 |
| | 参考文献 | 133 |

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 序文

道路は我々が生活する上で重要な役割を果たす社会資本であり、人や物の移動、市街地における街路の形成、電気、電話、ガス、水道といったライフラインを収納する共同溝等の地下構造物の収容に寄与している。また、道路の表面を覆う舗装は、雨天時の泥はねや乾燥時の砂塵の発生を抑制して環境負荷を軽減し、平坦性と適切なすべり抵抗性を確保して車両の走行性や安全性を向上させるという機能を有している。我が国で自動車の走行に供する舗装路面が構築されるようになったのは1903年頃のことである。東京市（現在の東京23区）では1931年に舗装率が55%を超えたとされているが、1960年代半ばまでは未舗装の道路が一般的であり、1965年の道路総延長988,774kmに対し簡易舗装を含む舗装率は7.4%にすぎなかった¹⁾。その後、モータリゼーションへの対応のため急速に舗装道路が整備され、2009年4月における道路総延長は1,200,225km、舗装率は約80%（市町村道、一般道路を除く道路では95%以上）に達している²⁾。

舗装の性能すなわち舗装が有する機能の高さは交通荷重や天候の影響を受けて低下するため、適切な補修が行われなければやがて破壊する。さらに、こうした状況を放置すると道路自体の破損にもつながる。したがって、道路がその役割を継続的に発揮するためには、日常的にあるいは定期的に舗装の補修を行い、走行性や安全性を回復させる必要がある。

近年、舗装の損傷状況を把握して劣化予測を行い、費用対効果の高い補修を実施することにより道路の管理水準を維持し、さらには要求されるアウトカムを達成する舗装のアセットマネジメント手法が幾つかの自治体や自動車専用道路を運営・管理する会社で取り入れられている。とりわけ、道路が人間の生活に欠かせない重要な社会資本であり、維持管理の重要性が認識されてきたこと、舗装のライフサイクルが10～20年と短く、劣化予測や費用対効果の検証が比較的容易であることが、舗装のアセットマネジメント手法が早期に確立してきた背景といえよう。一方、マネジメント手法やマネジメントシステムが確立したとしても、その運用にあたっては解決すべき課題が多い。公共投資の縮減により維持・

更新費の確保が難しい中で、現況の水準を維持するための新たな維持管理方策の確立が早急の課題となっている。

1.1.2 舗装の維持管理の技術基準とこれにかかる業務

舗装の維持管理の技術基準

道路の建設、改築や修繕にあたり遵守すべき事項は、法令等に記載されている。道路法（昭和27年法律第180号）第30条第1項と第2項の規定に基づいて道路構造令（昭和45年政令第320号，平成15年に政令改正され政令第321号）が制定され，道路を新築または改築する際の一般的な技術基準が定められている。また，道路構造令第32条第2項の規定に基づいて車道および側帯の舗装構造の基準に関する省令（平成13年国土交通省令第103号）が制定されたことを受け，舗装の構造に関する技術基準（平成13年6月29日付け国土交通省都市・地域整備局長，道路局長通達）が定められている⁴⁾。同技術基準は，車道，分離帯を除く中央帯，車道に隣接する路肩，自転車道および歩道の舗装等全ての舗装に共通する内容として，舗装構造の原則，舗装の設計期間，施工時の留意事項，積雪寒冷地域における凍土対策および必要に応じて定める舗装の性能指標について規定している。また，上記の省令が定める測定方法を実現できる測定法，新しい測定法の認定等についても規定している⁵⁾。

舗装の構造に関する技術基準では，効率的かつ効果的な舗装整備のために舗装の構造等に関して求められる性能指標を規定しているが，道路利用者の多様なニーズに応えるための設計・施工の自由度は高く，舗装の設計期間，舗装の計画交通量，性能指標等の道路管理における基本事項は道路のおかれている様々な状況に応じて道路管理者が定めるべき事項としている。また，同基準では，環境への配慮やリサイクルの推進も努めることとしており，従来の材料規定にとらわれず，要求性能を満足するものであれば現地調達や他産業からの発生材の使用を認めている。

したがって，道路管理者は舗装の維持管理にかかる政令や技術基準を遵守する限りにおいて，舗装の管理水準，施工方法，仕様材料等の具体的な事項については自ら設定し，これを満足するように舗装の維持管理業務を遂行していると考えられる。

点検・調査

点検は、施設の安全性、使用性、耐久性などにかかわる変状を発見し、マネジメントを効率的・効果的に行うための情報を得ると共に、施設の安全性に係わる不具合を早期に発見して致命的な損傷や重大な事故を未然に防ぐことを目的として実施される。一般的な点検の種類として、「日常点検」、「定期点検」、「特別点検」、「詳細点検」「異常時点検」がある⁶⁾。

舗装の維持管理においても、各点検に該当する調査が実施されている。具体的な例として、日常的な巡回パトロールや道路利用者からの情報提供に基づいて路面の状況把握を行う簡易調査、供用性能の経時変化を把握することを目的として定期的に路面の性状を調査する定量調査、舗装の破損原因を特定するために実施する破損原因の調査、道路利用者の満足度、維持・修繕が必要な箇所を把握するためのアンケートやヒアリングなどの意見調査がある⁴⁾。

日常の巡回パトロールにおいて、道路上の落下物や路面の局所的な破損等の安全性に係わる異常が発見された場合、障害物の撤去や応急的な補修（維持）が行われる。また、定量調査や破損原因の調査、意見調査の結果に基づいて大規模な補修（修繕）が行われる。表-1.1 に定量調査と破損原因の調査の代表的な項目とその方法を示す。

表-1.1 定量調査と破損原因の調査の代表的な項目と方法

| 調査の種類 | | 調査項目 | 調査方法等 |
|---------|-------|--------|----------------|
| 定量調査 | | 平たん性 | 3m プロフィルメータ 他 |
| | | わだち掘れ量 | 横断プロフィールメータ 他 |
| | | ひび割れ率 | スケッチ法 他 |
| | | 浸透水量 | 現場透水量試験 他 |
| | | すべり | BPT, DFT 他 |
| 破損原因の調査 | 開削調査 | 路床の支持力 | 平板載荷試験, CBR 試験 |
| | 非破壊調査 | たわみ量 | FWD, ベンゲルマンビーム |
| | | 舗装厚さ | 地中レーダ 他 |

路面の定量調査や破損原因の調査の結果は、修繕実施の判定や修繕工法の選定だけでなく、将来の修繕時期の予測や予算見積もりの重要な情報となりうる。現在、路面の性能を評価する指標として、平たん性、わだち掘れ量、ひび割れ率から求める維持管理指数 MCI

(Maintenance Control Index) や供用性指数 PSI (Present Serviceability Index) が、舗装の耐荷力を評価する指標として FWD (Falling Weight Deflectometer) による舗装のたわみ量等が採用されている³⁾。

舗装の管理目標と設計期間

舗装の管理上の目標として定められる設計期間には、路面の設計期間と舗装の設計期間がある。路面の設計期間とは、塑性変形抵抗性、平坦性等の性能を管理上の目標値以上に保持するように設定した期間である。また、舗装の設計期間とは、交通による繰り返し荷重に対する舗装構造全体の耐荷力を設定するための期間であり、疲労破壊により舗装にひび割れが生じるまでの期間とされる。一般的に、路面の設計期間は舗装の設計期間と同じか、または短く設定されている。図-1.1 は、路面の性能や舗装の耐荷力の管理目標と維持・修繕の関係を示している。

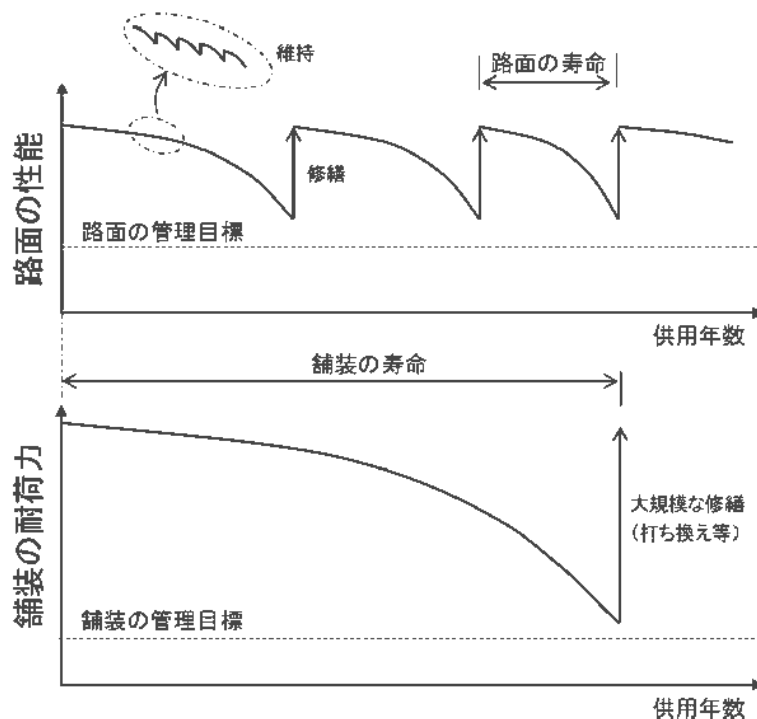


図-1.1 管理目標と維持・修繕の関係

舗装の維持・修繕工法

路面の性能や舗装の耐荷力が低下すると維持・修繕が行われる。舗装の維持とは、路面の性能を回復させることを目的に行われる軽微な補修であり、舗装の構造的な強度の低下を遅延させる効果も期待できる。維持には、日常点検で反復して実施されるものと予防的に行われるものがある。また、舗装の修繕とは、路面の性能が低下し、維持だけでは不経済もしくは十分な性能回復の効果が期待できない場合に実施する補修であり、舗装建設時の性能程度に復旧することを目的として行う⁴⁾。

表-1.2 に日常的な維持とその工法の例、表-1.3 に舗装の主な破損の種類と修繕工法の例を示す。表-1.2 のパッチングとは、路面に生じた小穴（ポットホール）や段差、小規模なわだち等の補修、注入は路面に生じたひび割れへのアスファルト系材料の流し込みによる応急的な補修であり、日常的な巡回パトロール時に実施される。一方、表-1.3 のオーバーレイは既設の舗装上にアスファルト混合物層を設けるものであり、応急的な補修では不経済な場合や交通量の増加によって舗装厚不足が生じた際に採用される。切削オーバーレイは、既設舗装で損傷が生じている層を切削した後にオーバーレイするもので、打ち換えは、舗装の構造的な損傷が著しく、他の修繕工法を採用しても良好な路面を維持することが困難な場合に舗装の全層を撤去して新たに舗装を設けるものである。

表-1.2 日常的な維持とその工法の例⁴⁾

| 維持の種類 | | | 維持および工法の例 |
|----------------|----------|---------------------------------|--------------------------|
| 日常計画的・反復的に行う維持 | | | 路面の清掃など |
| 局部的で 軽度な修理 | アスファルト舗装 | ポットホール、ジョイントの 開き、ひび割れなど | パッチング工法、シール材 注入工法 |
| | コンクリート舗装 | 目地材の剥脱飛散、目地部や ひび割れ部の角欠け、穴あき等 | パッチング工法、シーリン グ工法、注入工法 |

維持管理記録の更新と活用

新たに道路を建設する場合を含め、舗装の修繕が実施されると維持管理記録が更新される。維持管理記録は、舗装が適切に管理されていることを示す重要な資料であると共に、次の修繕の時期、修繕工法選定に必要な情報を管理者に提供するものであり、適切に保管されなければならない。従来、管理記録の大部分は紙ベースで保管されており、保管場所の確保や管理項目の追加・変更等の問題が生じていた。近年では、維持管理記録のデータ

表-1.3 舗装の主な破損の種類と修繕工法の例⁴⁾

| 舗装の種類 | 破損の種類 | 修繕工法の例 |
|--------------|-------------|---|
| アスファルト 舗装 | ひび割れ | 打ち換え工法，表層・基層打ち換え工法，切削オーバーレイ工法，オーバーレイ工法，路上路盤再生工法 |
| | わだち掘れ | 表層・基層打ち換え工法，切削オーバーレイ工法， |
| | 平坦性の低下 | オーバーレイ工法，路上表層再生工法 |
| | すべり抵抗値の低下 | 表層打ち換え工法，切削オーバーレイ工法，オーバーレイ工法，路上表層再生工法 |
| コンクリート 舗装 | ひび割れ，目地部の破損 | 打ち換え工法，オーバーレイ工法，切削オーバーレイ工法， |
| | わだち掘れ | 局所打ち換え工法 |
| | 平坦性の低下 | オーバーレイ工法，切削オーバーレイ工法，局所打ち換え工法 |
| | 段差 | オーバーレイ工法 |
| | すべり抵抗値の低下 | オーバーレイ工法，切削オーバーレイ工法 |

ベース化が国や一部の自治体で進んでいる。例えば国土交通省では、所管の道路の修繕記録を道路管理データベースシステム（MICHI）で管理しており、修繕工事の業務として同データベースの更新も行っている。さらに、国土交通省 CALS/EC アクションプログラム 2008 において、調査・計画・設計・施工・管理を通じて利用可能な電子データを活用するため、必要な書類については完全電子納品化を行うと共に、これらの流通が図れるようなシステムならびに全フェーズで共通して利活用が図れるような電子データシステムの構築を目指すとしている。データベースの保守方法や互換性の確保等で課題が残されているものの、維持管理記録のデータベース化は記録更新の効率化や省力化、データ検索の効率化に有効であるといえる。

1.1.3 舗装の維持管理における課題

図-1.2 は、国土交通省所管の社会資本を対象に、過去の投資実績等を基に今後の維持管理・更新費を推計したものである。今後の投資可能総額の伸びが 2010 年度以降で対前年度比± 0%、維持管理・更新に関して今まで通りの対応をした場合、維持管理・更新費は 2037 年度には投資可能総額を上回る。一方、維持管理・更新費について、アセットマネジメント手法等の先進的な取組みを行っている地方公共団体と同じレベルまで他の地方公共団体が早期発見・早期改修の予防保全の取組みを強化したケースにおいては、維持管理・更新費が投資可能総額を超えるのは 10 年伸びて 2047 年度となるが、その後は投資可能総額を

上回る¹⁰⁾。

こうしたことから、舗装の維持管理にアセットマネジメント手法を適用しても将来的には管理水準の引き下げを余儀なくされることが予想される。さらに、維持管理・更新費の縮減により調査予算を確保できなければ、舗装の損傷の実態を把握することも困難となる。その結果、適切な修繕が実施されずに早期に舗装の破損が生じ、管理水準の一層の低下を招くことも懸念される。

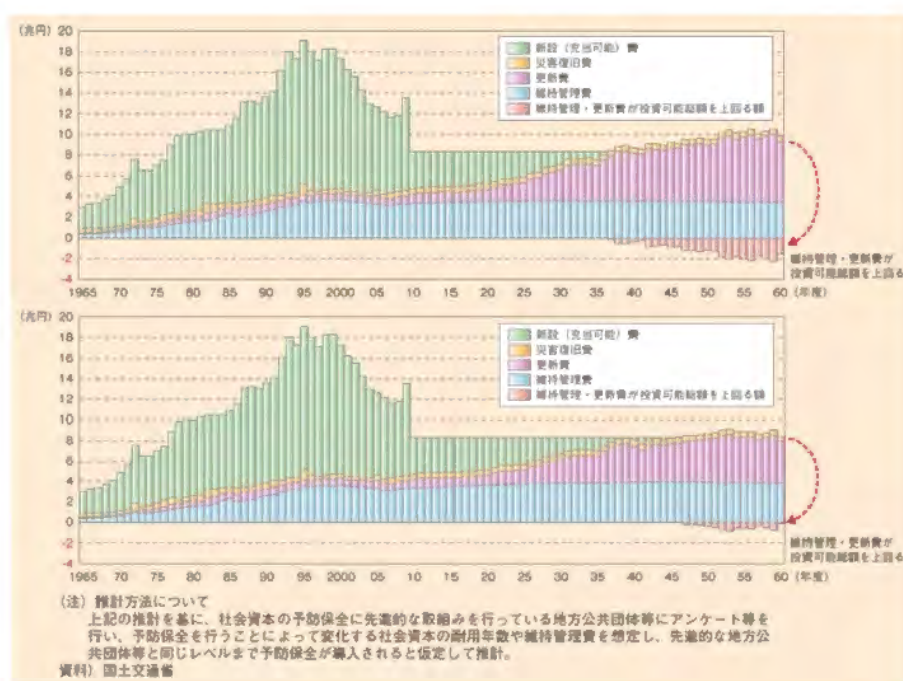


図-1.2 社会資本を対象とした維持管理・更新費の推計¹⁰⁾

公共投資縮減の背景には、道路をはじめとする社会資本の維持管理の必要性について利用者の理解が得られていないという指摘もある^{8) 11)}。また、道路に深刻な損傷が生じる前に補修を行ってきた結果、利用者は舗装の性能が保たれていることが当然のように感じている。ところが、舗装の維持・修繕が実施されなければ走行性や安全性が損なわれ、ひとたび事故が発生すれば道路管理者は過失の有無にかかわらず瑕疵の責任を負う。道路管理者は、適切な維持管理を実施すれば利用者の関心が薄れて維持管理の重要性の理解が得られず、維持管理が適切に行われなかったために事故が生じれば、過失が無いとしても管理責任を問われるというジレンマを抱えている。こうした問題を解決するためには、従来のアセットマネジメントで採用されているライフサイクルコスト（LCC）最小化の維持管理だけで

はもはや不十分であり、舗装技術の継続的な改善によって、舗装の耐久性向上が図られるような維持管理方策が必要である。同時に、道路利用者に対して維持管理の必要性を粘り強く説明することも重要である。

1.2 研究目的

社会資本の大規模な維持・更新の時代を迎える中で、これらの管理者が効率的・効果的な補修戦略を立案し、これを実践して事後評価を行うことは、社会資本がもたらすサービス水準の確保や維持管理の説明責任を果たす上で非常に重要である。本研究では、アスファルト舗装に着目して、前述の問題解決に寄与する舗装維持管理に関する方法論を提案することを目的とする。具体的には、以下の方針で分析を行う。

1.2.1 日常的な補修箇所の耐久性向上

道路の日常点検の目的は、道路落下物の撤去や局所的な損傷箇所（道路構造物も含む）の緊急補修（維持）を実施して道路利用者の安全性を確保し、路面の性能を回復させて構造的な寿命の延命化を図ることである。通常、日常点検において発見された軽微な損傷箇所は補修用常温アスファルト混合物を用いて補修される。同混合物は多くの種類が市販されており、混合物の特性を理解して損傷状況に応じて適材適所に用いることが重要である。新たな混合物を入手した際にも、事前にその特性を知ることができれば、適用可否の判定も容易となる。そこで、既存の室内試験法を用いて補修用常温アスファルト混合物の適性を評価する手法を提案する。

次に、舗装の局所的な損傷の中でも特に発生頻度の高いポットホールに着目し、ポットホールが繰り返し発生する過程をモデル化し、ポットホール発生条件や補修条件と再度ポットホールが発生するまでの期間（寿命）を点検データを用いて推定する。この推定結果を踏まえてポットホール補修箇所が早期に破損する原因を究明し、補修箇所の耐久性向上に寄与する要素を明らかにする。

1.2.2 舗装の構造的な損傷箇所の抽出

修繕を実施するかどうかは、図-1.1に示すように路面の性能が管理目標に達しているか、また、舗装の耐荷力が管理目標に達しているかで判断される。一般的に、路面の管理目標

は維持管理指数 MCI が、舗装の管理目標は舗装の耐荷力を間接的に示すたわみ量が用いられるケースが多い。路面の状態は路面調査や目視で容易に判定できるが、舗装各層の耐荷力は開削調査を実施しない限り正確に知る手段は無い。舗装のたわみ量データは幾らかの誤差を含む舗装の耐荷力を明らかにできるが、その情報を得るための調査コストは開削調査よりも低いものの路面調査と比較して非常に高く、管理路線の全線でたわみ量調査を実施することは現実的ではない。そのため、耐荷力の低下が疑われる箇所を効率的に抽出する手法が求められる。

そこで、交通条件や舗装構成が同じ路線の路面の劣化速度は、基層より下の層の損傷状況に依存することに着目し、劣化速度の違い（異質性）を供用年数および路面の健全度のデータを用いて推計する。また、実証分析として、異質性が高いと認められる路線を対象にたわみ量調査を実施し、舗装の構造的な耐荷力を評価する。さらに、劣化速度の異質性と過去の修繕履歴の関係について分析する。

1.2.3 修繕に用いる望ましい舗装材料の選択

道路管理者にとって大きな関心の一つは、損傷が生じた舗装路面に用いる修繕材料の選択である。道路管理者は、損傷が生じた路面の修繕に際して、過去の修繕履歴データや修繕後の経過観察結果を照合して、修繕工法や材料を選択する。ところが同データは、採用した材料とその結果（耐用年数）の情報の集まりであり、同じ条件で別の材料を選択した際に得られたであろう結果を管理者は知ることができない。これは、同一条件で他の材料に関する情報が欠測していることを意味する。さらに、材料は複数の候補からランダムに選定されるのではなく、材料の物理性状や気象条件、交通条件、経済情勢など多くの要素を踏まえて選択される。これらの要素は、材料選択だけでなく耐用年数にも影響するため、個々の材料の耐用年数を単純集計で評価するとバイアスが生じることが懸念される。

そこで、舗装材料固有の劣化速度の違いを異質性とし、前項と同じ手法を用いてこれを推計する。また、不確実さを含む各材料の耐用年数の情報から望ましい材料を選択するモデルを構築する。

1.2.4 社会実験的な試験施工による舗装材料の継続的改善

舗装の維持管理の課題は、維持管理費の縮減が進む中での舗装サービス水準の確保であり、舗装の早期破損が維持管理上最も大きな問題といえる。舗装の早期破損を防ぐために

は、路面が早期に劣化する原因を究明すると共に、従来からの望ましい舗装材料と耐久性向上が期待できる新材料の相対評価を実施してベストプラクティスを選定し、以後の維持管理に反映させる必要がある。

そこで、社会実験的なアプローチを導入して舗装の耐久性を舗装材料の観点から評価する手法を提案する。具体的には、試験施工で舗装材料の耐久性を評価するための要件について述べる。また、実証分析では、積雪地域の耐久性向上に資する新たな材料の基準を設定し、同基準を満足する材料、既存の望ましい材料、経済的な材料を用いて修繕の試験施工を実施する。さらに追跡調査を実施して相対評価を行い、本手法の妥当性を検証する。

1.3 本研究の構成

本章では、舗装の維持管理の現況と課題を示した。2章では舗装マネジメントの実践に不可欠な舗装マネジメントシステムの概要と問題点を示す。次いでアセットマネジメントの考え方を示し、新たなアセットマネジメントの国際規格の内容を紹介する。これらを踏まえて、舗装アセットマネジメントに必要とされる舗装技術の継続的な改善のあり方について述べる。

3章では、日常点検で実施する緊急補修において、補修箇所の耐久性向上に寄与する幾つかの方法論を示す。ここでは、緊急補修に用いる補修用常温アスファルト混合物の物理性状を室内試験で評価する手法を示し、これに基づいて混合物の適性を判定する。また、現道において補修箇所の耐久性を評価するために緊急補修箇所のモニタリングを実施し、モニタリングデータにワイブル劣化ハザードモデルを適用する。モデルの推計結果から、補修箇所の耐久性向上に資する補修条件を示す。

4章では、修繕が必要な道路区間において、特に舗装の構造的な損傷が生じている箇所を効率的に抽出する手法を提案する。構造的な損傷箇所を効率的に絞り込むことができれば、構造調査に要する費用を必要最小限に抑えることが可能となる。そこで、構造的な損傷に起因する相対的な劣化速度の違い（路面の劣化速度の異質性）を混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて推定する手法を示す。また、実証分析として兵庫県北部地方の積雪地域の国道を対象に同モデルを適用し、劣化速度の異質性の高い区間でたわみ量調査を実施してたわみ量と異質性の関係について述べる。さらに、対象区間の道路の修繕履歴を踏まえて過去に繰り返し実施された修繕の方法とたわみ量の関係についても言及する。

5章では、4章と同じモデルを用いて修繕に用いる舗装材料固有の劣化特性を評価する。

さらに、材料の選択、耐用年数の双方に影響する要素を共変量とみなし、共変量で条件付けられた各材料の劣化特性に関する情報を整理する。この情報には選択されない材料に関する情報の不確かさが含まれているため、劣化が最も遅い材料すなわち最も耐久性の高い材料を特定することができない。そこで、望ましい材料を選択するための選択モデルを構築する。また、4章と同じ国道を対象として分析を行う。

6章では、4章や5章で得た知見を踏まえて修繕に使用する舗装材料の観点から舗装技術の継続的な改善を達成するための方法論を提案する。修繕後の路面の早期劣化を防ぐためには、その原因を究明し、問題解決に寄与する耐久性の高い材料を適用することが重要である。一方、舗装路面の劣化の進行は、既設の舗装の構造的な損傷や交通条件、気象条件も関係しており、これらの影響を考慮せずに材料の耐久性を評価することは難しい。そこで、社会実験的なアプローチで材料の耐久性を相対的に評価する一連のプロセスを示す。さらに、実証分析では試験施工の追跡調査結果を踏まえて、本方法論の妥当性を検証する。7章では、本研究の総括として結論を述べる。

第2章 舗装マネジメントの現況と課題

2.1 総説

舗装マネジメントは世界中で用いられている舗装管理の手法である。舗装マネジメントの確立は、継続的な舗装技術の進歩や技術革新、管理責任、あらゆる階層のユーザーにサービスすることの重要性の認識によって達成されたとされる¹²⁾。W.R.Hudsonらは、「Pavement Management」とは、あらゆる管理レベルにおける最適手法の認識とその実行を意味する。それは、舗装を適切な供用水準におくための建設、維持に関するあらゆる行動の工程をすべて包含するものである。それらは、初期の情報収集から、新設、維持、修繕の計画、さらには個々のプロジェクトの設計・施工の詳細、供用中の舗装の定期的な監視に至るまで広い範囲に分布する」と定義している¹³⁾。舗装が道路利用者に提供する走行性や安全性等の機能が交通荷重や気象条件により経年的に失われること、トンネルや橋梁と比較して耐用年数が短いこと、舗装の機能が完全に失われてから再構築した場合、大きな社会損失が発生すること等から、舗装の性能を一定水準以上に維持する舗装管理手法の必要性が認識されてきたことが、舗装マネジメントが発達した背景といえる。

本章では、我が国における舗装マネジメントの現状と課題を示すため、まず、舗装マネジメントに不可欠な舗装の性能の考え方とその評価法を紹介する。次いで、舗装マネジメントの新しい取り組みとして注目されているアセットマネジメント手法と舗装マネジメントシステム（PMS:Pavement Management System）の考え方と問題点を示す。さらに問題解決の方向性を明確にするため、2014年に発効予定のアセットマネジメント ISO 規格（ISO55000 シリーズ）の特徴を示し、これを踏まえて舗装技術の継続的な改善の必要性について述べる。

2.2 舗装の性能の評価法

2.2.1 路面の評価

1章の図-1.1のように、縦軸に舗装の供用性能（サービスアビリティ）⁴⁾、横軸に供用年数を取り、これらの関係を表したものを舗装のパフォーマンスという³¹⁾。舗装の供用性能

は、道路利用者に乗り心地の良い安全な路面を提供できる能力とみなすことができる。舗装のパフォーマンス指標に道路利用者や周辺住民の要望と直接的な関係のある乗り心地や安全性というサービスを提供する能力を設定すれば、舗装に関する専門的な知識を持たない一般人にも維持修繕の必要性についての理解が得られやすい。その反面、こうした指標は舗装の耐荷力や細かい路面形状の変化を反映したものではないため、パフォーマンスの将来予測をすることが難しい。一方、路面のひび割れや凹凸の度合いのように路面を客観的な性状で示した指標は、路面の損傷程度に対する道路管理者の技術的な判断（補修が必要かどうか）や将来予測に有効であるが、性能の良否の判定に専門的な知識が必要なため、利用者や周辺住民の理解が得られにくい。前者の指標はサービス指標、後者は管理指標と呼ばれている。各指標の特徴とメリット・留意点¹⁵⁾を表-2.1に示す。

表-2.1 サービス指標と管理指標の特徴とメリット・留意点¹⁵⁾

| 指標分類 | パフォーマンス指標 | |
|-----------|--|--|
| | サービス指標 | 管理指標 |
| 評価主体 | 利用者 (道路利用者/沿道住民/地域社会全体) 道路管理者 | 道路管理者 |
| 評価対象 | ・道路利用者の視点からみた道路機能 | ・道路管理者の視点からみた道路機能 |
| 特徴 | ・道路利用者へ説明するため、利用者にとって分かりやすい項目を設定する必要がある ・道路資産管理の結果、道路利用者が受けるサービスで表現する | ・道路管理者が具体的に実施する項目として設定する必要がある ・道路施設の健全度、交通の状況、道道管理の頻度等で表現する |
| 指標（例:快適性） | ・乗り心地の満足度 | ・わだち掘れ、平坦性、IRI 等 |
| メリット | ・国民や道路利用者が実感できる指標であるため、分かりやすい | ・具体的な管理項目であるため、管理者が設定しやすい ・実施率等で評価できるため、事業の効果が把握しやすい |
| 留意点 | ・構造物の劣化の進行や機能低下などを直接表現した指標ではないため、将来見通しや構造物保全などの長期的に発現する効果が見えにくい | ・専門用語を用いているため、知識を持たない国民にとって分かりにくい ・管理指標が改善によってもたらされる便益ではないため、B / C 等を用いた投資効果を表現しにくい |

サービス指標のような道路利用者、沿道住民の主観的な満足度と管理指標の客観的な路面の性状を結びつける研究も多くされており、サービス指標と関連性の高い路面性状を表

す指標が提案がされている。それらの大半は、舗装の破損の程度をわだち掘れ深さやひび割れの割合などの損傷度合いで表し、各損傷度合いの実測値が判明すればサービス指標と相関のある路面性状が一義的に決定するという考えに基づいて定式化されている¹⁶⁾。米国全州道路交通運輸行政官協会（AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials）の前身である AASHO は、舗装の合理的かつ経済的な設計を行うため、約 10 年の歳月と当時の額で 100 億円という巨額の費用を投入して道路試験を実施した。1962 年に公表された AASHO 道路試験の報告書は、舗装に携わる技術者に貴重な資料を提供するものであり¹⁷⁾、その中で、舗装性能の評価に供用性指数 PSI（Present Serviceability Index）の概念を初めて導入した¹⁴⁾。具体的には、ある特定区間の乗り心地を表-2.2 のように 5 段階で評価し、各区間の測定時の PSR（Present Serviceability Rating）の平均値を算出し、路面の損傷度合いの実測値との間で重相関分析を実施し、路面の縦断方向の凹凸、わだち掘れ量、ひびわれ度、パッチング度をパラメータとする PSI の評価式を作成した。

我が国においても、AASHO 道路試験で開発された PSI の式を参考にして、路面の平坦性、わだち掘れ量、ひび割れ率の 3 特性値をパラメータとする独自の PSI を考案した¹⁹⁾。その後、道路管理延長の増大、舗装の維持修繕に対する沿道住民の要望の高まり、個々の車両の走行性の相違により、走行性で路面を評価して維持管理に反映させることが困難となったため、旧建設省では新たな指標として維持管理指数 MCI（Maintenance Control Index）¹⁸⁾を開発した。MCI の開発ならびに同評価式の算定にあたっては、3 つの特性値と道路管理者による路面の視察結果により表-2.3 の点数が判明している全国（沖縄を除く）の直轄国道 1808 箇所（区間延長 100-300m）のデータを用いている。我が国の PSI と MCI の算定式をそれぞれ式 (2.1)、(2.2) に示す。また、各指標の値の対応手法、維持修繕の基準を表-2.4、表-2.5 に示す。

$$PSI = 4.53 - 0.518 \log \sigma - 0.371C^{0.5} - 0.174D^2 \quad (2.1)$$

$$MCI_0 = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.3D^{0.7}$$

$$MCI_1 = 10 - 2.23C^{0.3}$$

$$MCI_2 = 10 - 0.54D^{0.7}$$

$$MCI_3 = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2}$$

$$MCI = \min\{MCI_0, MCI_1, MCI_2, MCI_3\} \quad (2.2)$$

ここに、

C : ひび割れ率 (%)

D : わだち掘れ量 (MCI : mm, PSI : cm)

σ : 平たん性 (mm)

である。

表-2.2 乗り心地の評価

| PSR | 評価 |
|-----|-------|
| 5 | 非常に良好 |
| 4 | 良好 |
| 3 | 普通 |
| 2 | 悪い |
| 1 | 非常に悪い |

表-2.3 MCIの得点と評価

| ランク | 点数 | 評価 |
|-----|----|------------------------------|
| A | 10 | 全く欠陥が認められない(良) |
| B | 8 | いくぶん欠陥があるが良好とみなされる |
| C | 6 | 欠陥は多いが修繕を要しない |
| D | 4 | 簡単な修繕を要する(パッチング, 部分的シールコート等) |
| E | 2 | 大規模な修繕を要する(オーバーレイ, 打ち換え等) |

表-2.4 PSIとおおよその対応工法¹⁹⁾

| PSI | 対応工法 |
|-------|--------|
| 3-2.1 | 表面処理 |
| 2-1.1 | オーバーレイ |
| 1-0 | 打ち換え |

表-2.5 MCIと維持修繕の基準³⁾

| MCI | 維持修繕基準 |
|-----|----------|
| 3以下 | 早急に修繕が必要 |
| 4以下 | 修繕が必要である |
| 5以上 | 望ましい管理水準 |

式(2.2)で示しているように、MCIは2または1つの特性値でも導くことができる。これは、車両の大型化や重量化に伴い特定の特性値の変化が顕著に現れる可能性が生じたこと、また、地域によって3つの特性値全ての情報が得られない可能性があることに配慮したものである。PSIとMCIは取り得る値に相違があるが、尺度を合わせて比較すると、MCIはわだち掘れ量の影響度が相対的に高く¹⁸⁾、これに起因するハンドルとられ、ハイドロプレーニング現象等、走行安全性の問題を考えた場合には適切な指標といえる。一方、MCIが開発されて20年が経過した現在において、当時と比べて経済状況、車両の性

能、沿道住民の関心等が変化する中で、果たして MCI が現在の管理指標として適しているかという懐疑的な指摘もある²⁰⁾。

2.2.2 舗装の構造評価

路面のパフォーマンスは、舗装表面の状態を観察することで判定できる。一方、舗装の構造的なパフォーマンスすなわち舗装の耐荷力については、路面の状態から判定することは困難である。舗装の構造調査は、主に舗装の構造的な損傷の程度を把握すること、損傷が生じている範囲、損傷原因を特定して修繕が必要な層を決定することを目的として実施される。

舗装構造を評価する方法には、舗装を掘削して内部の状況を直に観察する破壊試験法、路面に外力を加えたときに生じる変形量（たわみ量）や地中レーダを用いて舗装各層の厚さを調べる非破壊試験方法がある。破壊試験法は、舗装体の損傷箇所の特定や原因の究明に有効な手段である反面、掘削・調査・復旧のために多くの時間と費用を要すること、その間、交通規制に伴う渋滞により非常に大きな社会損失が生じることから、路線全体の評価には適さない。地中レーダによる各層の厚さの計測は、舗装厚の変化を継続的に観察して何れの層に問題が生じているかを判断するものであるが、層厚の変化と支持力低下の関係を明確に示すことは難しい。現在、舗装各層の支持力を破壊試験よりも早くかつ間接的に評価するたわみ量の測定法が一般的であり、その中でも路面に錘を落下させたときに生じるたわみ変形量を計測する FWD（Falling Weight Deflectometer）が、道路、空港、ヤードにおける各種舗装や軌道道床などの支持力評価や構造評価に幅広く活用されている²¹⁾。FWD による調査では、錘の落下位置から一定間隔で配置された荷重センサの位置で観測されるたわみ量の実測値を用いて損傷が生じている層を特定する。これにより、舗装の修繕工法の選択に有用な情報が得られる。また、図-2.1 に示すたわみ量と破損に至るまでの走行輪数（走行車両の荷重を 49kN に換算した輪数）ならびに現在の交通量の関係から、疲労破壊が生じる大まかな時期を推測することも可能である。

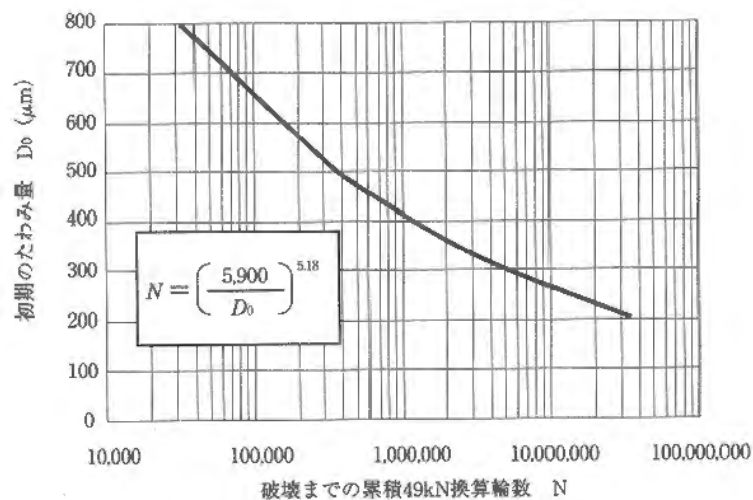


図-2.1 たわみ量と49kN換算輪数の関係²²⁾

2.3 アセットマネジメント手法の導入

2.3.1 アセットマネジメントの定義と特徴

社会資本のアセットマネジメントとは、社会資本という国民の資産を適切に管理、運用するための手法である。アセットマネジメントという言葉の定義は、アセットを管理する機関等より幾つか示されている⁷⁾。道路を対象としたものとして、国土交通省の「道路構造物の今後の管理・更新のあり方に関する検討委員会」の提言²⁴⁾によれば、「道路を資産として捉え、道路構造物の状態を客観的に把握・評価し、中長期的な資産の状態を予測すると共に、予算的制約の中でいつどのような対策をどこに行うのが最適であるかを考慮して、道路構造物を計画的かつ効率的に管理すること」とされている。

アセットマネジメントが注目されてきた背景として、図-2.2に示すように我が国では戦後の高度成長期に建設した道路構造物の高齢化が、いわゆる「荒廃するアメリカ」²⁵⁾が生じた1980年代初めのアメリカよりも30年遅れて到来してきたこと、また、1990年代後半以降、建設投資額が減少していることがあげられる。労働人口減少に伴う税収の落ち込みと社会保障費の増大により、今後、建設投資の縮減が一層進むと予想される中で、社会資本の維持管理手法としてアセットマネジメントへの関心が高まってきたことは当然のことといえる。以下にアセットマネジメントの特徴を述べる。

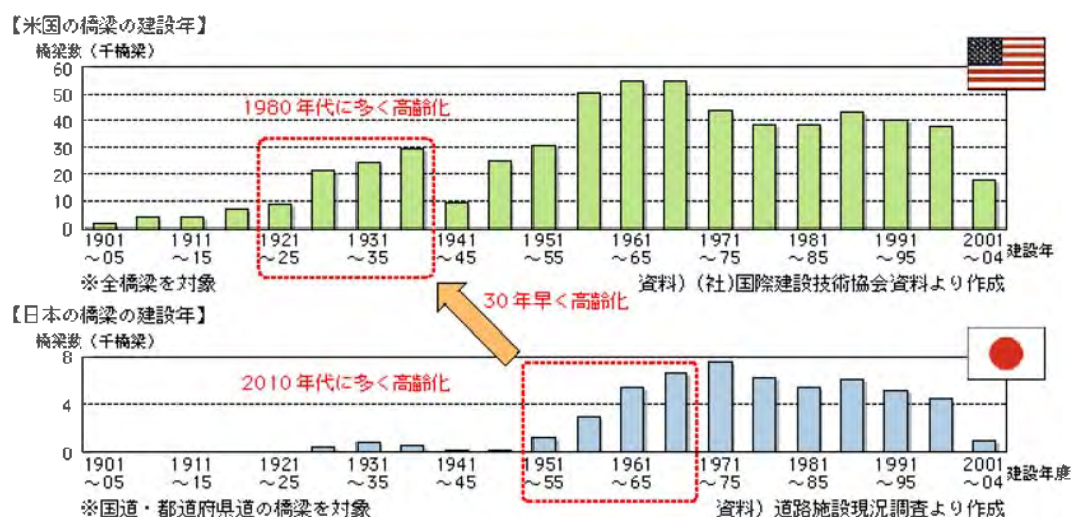


図-2.2 日米の橋梁の建設年の比較²³⁾

総合化技術

限られた予算の中で公共資産を効率的に管理するアセットマネジメントに着目した研究^{26) 27)}は、2002年頃から多く報告されている。貝戸ら²⁸⁾は、土木施設のアセットマネジメントを単なる土木工学の個別の要素技術の接合ではなく、経済学、経営学、会計学を融合した総合化技術と捉え、広範囲にわたる学術領域の理解を必要とするアセットマネジメントを俯瞰的な視野から実践するためには、全体的な枠組みの中から、要素技術の開発、改良、取捨選択して体系づけることが重要であると指摘している。そのためには、マネジメントの意志決定に至る知識、知識の根拠となる情報、情報源である過去の意志決定という3つのサイクルから得られる管理者の“経験”を分かりやすく「見える形」にする必要がある。今後、経験を積んだ熟練者の多くが定年を迎える中で、経験で得た知見を若手技術者へ伝承するため、また、意志決定から恣意的な要素を排除するため、アセットマネジメントによる経験の“見える化”は緊急の課題となっている。

アカウンタビリティ

社会資本の管理者は、社会資本という資産の維持管理の意志決定を国民に変わって実施する代理者であることから、資産の所有者である国民に対して意志決定に至った経緯とその結果についての説明責任を負う。国民の全てが意志決定にかかる知識を有しているとは限らないため、その正当性を判定することは困難である。したがって、管理者には意志決

定の合理性、維持管理の効果や予見を国民に分かりやすく説明することが求められる。アセットマネジメントを実践する目的は、こうした説明責任を果たすことでもある。

階層的管理サイクル

多くの住民の生活を支える社会資本は、日常的な消費財と比較して寿命がはるかに長く、空間的、時間的な繋がりを有している。このようなアセット群を維持するためには、アセットの寿命全体を通じた最適な維持管理計画を策定、実行する戦略レベル、その中で、アセットに対するニーズの変化、アセット自体の劣化の不確実性などを踏まえてアセット群の補修の優先順位を決定し、中期的な補修計画に予算を付けて執行する戦術レベル、さらに中期的な補修計画で選定されたアセットを対象として、当該年度における補修計画の立案や実際の補修を行う実施レベルの3つの階層的管理が必要となる。アセットマネジメントは、基本計画の策定（Plan）、計画に基づくマネジメントの実施（Do）、マネジメント結果の評価（Check）、次回のマネジメント計画につなげる改善（Action）のPDCAサイクルによって実践される。舗装マネジメントにおける各階層のPDCAの関係をみると、戦略レベルで維持管理の全体的な基本計画を策定し、その計画で示された基本方針に従って路線の重要度、利用状況を踏まえて修繕の優先順位を戦術レベルで決定し、この決定に基づいて実施レベルで修繕や日常的な維持の計画を定めて実行する。これらの結果は各レベルで評価され、次の計画の策定や上層のマネジメントレベルの評価に反映される。例えば、実施レベルの修繕情報や日常点検で発見された緊急性の高い路面の異常の情報は、戦術レベルにおける優先順位の設定の資料となる。また、優先順位を定めて補修を実施した結果とこれによる道路ネットワーク全体の健全性の変化は、戦略レベルで設定する管理水準の見直しに生かされる。この関係を図-2.3に示す。

2.3.2 舗装マネジメントシステムの発展と背景

舗装マネジメントシステム PMS（Pavement Management System）は、“道路舗装に関する費用と効果を管理者、利用者、環境の立場から考え、多くの調査と情報を利用してパフォーマンスの予測に基づいた維持管理を行い、これらの総合した費用対効果を大きくするための、すなわち全ての舗装投資に対して最大の経済効果を上げるようなシステムを指す”²⁹⁾。言い換えれば、道路舗装に係わる全ての行為（計画、設計、施工、維持、修繕、評価、データ集積）を体系づけ、道路利用者に提供する舗装のサービス水準を一定水準以上

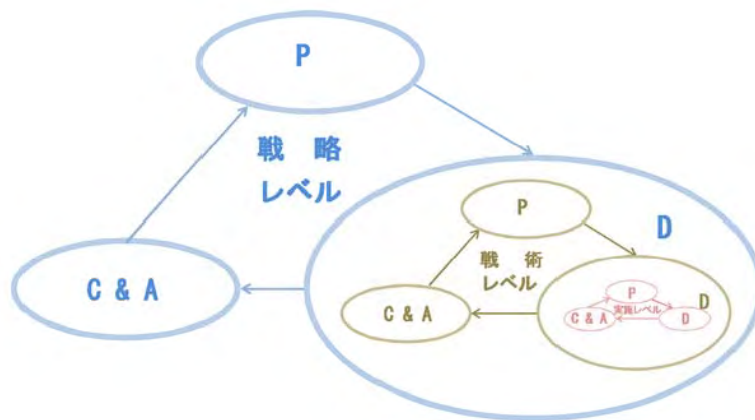


図-2.3 階層的マネジメントフロー

に保つために必要な総費用（道路管理者費用，道路利用者費用，沿道住民の費用）を最小化するシステムといえる。PMS という用語は，“舗装を利用者に提供するあらゆる行為を含むもの”として研究者の間で使われ始めたとされている³⁰⁾。PMS の開発・運用は 1970 年代半ばからアメリカ合衆国が最も積極的に取り組み始めた。連邦道路局 FHWA（Federal Highway Administration）は 1980 年に Pavement Management の開発を全ての州に要請した。その 9 年後の 1989 年，FHWA は 4 年以内に PMS の開発と実施を全ての州に義務づけ，PMS 導入を条件に補助金を拠出することとした。これを受けて各州の道路局 DOT（Department of Transportation）は大学やコンサルタントの協力のもとで各州独自の PMS の開発を始めた³¹⁾。

PMS の開発はアメリカに限らず欧州各国をはじめ世界的に実施されてきたが，このように PMS が開発・発展した背景として，以下の理由が考えられる³²⁾。

- 膨大な量の投資が道路建設のために実施されている
- これによって建設された舗装を適切な水準に保つため，毎年多額の維持修繕の投資がされている
- 舗装の建設および維持修繕の予算は近年厳しく制限されており，限られた予算を最大限に利用するためのマネジメントが必要である

我が国においても同様な理由により PMS への関心が高まり，PMS を理解するための書籍が多く発刊されている^{29) 33) 34)}。

2.3.3 ネットワークレベルとプロジェクトレベルの活動

PMSにおける一連の活動は、対象とする範囲やマネジメントを実践する過程あるいは状況によりネットワークレベルとプロジェクトレベルに分類される。ネットワークレベルとは、管理区間内の道路をまとめて「ネットワーク」と捉える概念である。ネットワークレベルのマネジメントは、さらに計画レベルとプロジェクト選定レベルに分類され、前者は予算の設定とその配分、後者は個々のプロジェクトの中から実施すべきものの優先順位の決定に関係している。ネットワークレベルにおけるマネジメントの目的は、ネットワーク全体の舗装路面の平均的な性能が将来的にどのように変化するかを合理的に予測し、性能をある水準以上に保つために必要な最小費用を求めることである。また、プロジェクトレベルは、ネットワーク内の道路を単位区間等の形で分割してとらえる概念であり、プロジェクトレベルのマネジメントは、路線の対象区間の舗装の性能を所定の水準以上に保つ補修戦略のなかで、ライフサイクルコスト（LCC）が最小となる工法や時期を選定することを目的として実施される³¹⁾。

PMSによる舗装の維持管理を実践するためには、各マネジメントレベルでの適切な情報（質・量）の収集が重要である。例えば、ネットワークレベルにおいては、個々のプロジェクトのLCCの大小関係を明らかにするため、全路線の舗装の性能に関する情報が必要となるが、各路線の材料、修繕履歴および損傷程度の情報は特に重要ではない。一方、プロジェクトレベルでは、特定の路線の情報のみで良いが、図-2.4のように複数の補修戦略でLCCを見積もるため、使用材料、修繕履歴、損傷の程度に関する情報の確かさが求められる。

2.3.4 舗装マネジメントシステムの運用にかかる問題

国土交通省の提言²⁴⁾、さらに平成19年4月に制定された長寿命化修繕計画策定事業費補助制度要綱により、地方自治体においても道路構造物の維持管理にアセットマネジメント手法を取り入れる動きが広がっている。舗装の維持管理についても、計画的な維持修繕が橋梁や道路の長寿命化に寄与することから、本手法を用いた舗装の維持管理の取り組みが多く報告されている。その報告をみると、舗装の維持修繕にかかるLCCを最小にする手法が多く採用されているが、これは先に示したPMSによるマネジメント手法と本質的には同じである。マネジメントのレベルについても、戦略レベルはネットワークレベルの計画レベル、戦術レベルは同プロジェクト選定レベル、実施レベルはプロジェクトレベルと

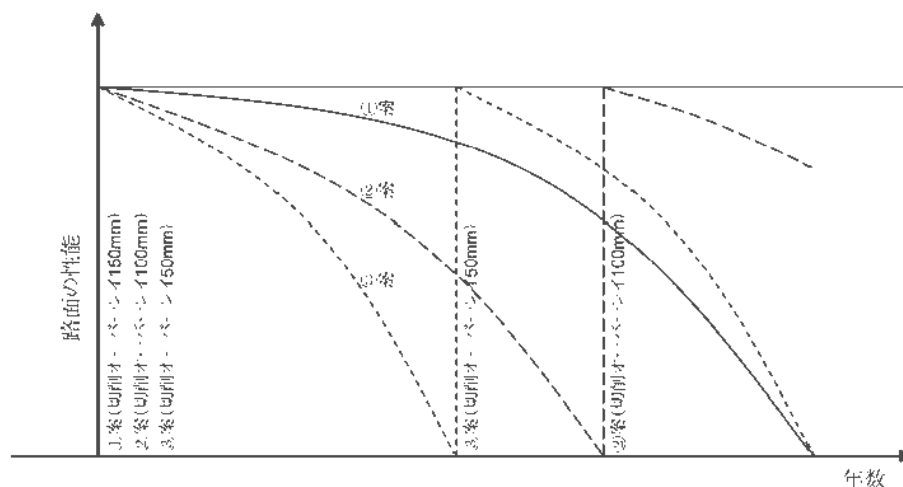


図-2.4 補修戦略とパフォーマンスの関係

読み替えることもできる。

舗装を建設から廃棄まで総合的に捉え、限られた予算を効率的に活用して道路利用者に安全で快適な舗装路面を提供することを目的として開発されたPMSに関して、その概要や枠組みが我が国で初めて紹介されたのは菊川の報文³²⁾であろう。これ以降、国内でPMSの重要性の認識が高まり、多くの研究や取り組みが行われている^{36)~38)}。その多くは、プロジェクトレベルにおけるLCCの最小化やそのための劣化予測手法の改良である。これらの研究成果によりPMSを構成する要素技術（路面性状の測定技術も含む）は向上しているが、総合技術として実務的な運用に至っているものは少ない。PMSの普及あるいは運用を阻害する要因は、以下のものが考えられる。

役割分担

PMSの各レベル（ネットワークレベル、プロジェクトレベル）の概念と分類は、多くの公的機関で実際に起こる状態を表しているにすぎず、PMSに関する論文においてもしばしば混同されることが指摘されている³⁴⁾。また、各レベルに相互関係があるものの、システム間、マネジメントレベル間の境界が明確でないため、実務者の誰がどのレベルでどのようなサブシステムに係わっているか分かりにくい。そのため、明確な役割分担が設定されていない組織において、PMSを正しく運用させることは難しい。

システムの汎用性

PMS で最も重要な事項は、個々の補修戦略における劣化予測と補修にかかる費用の算定である。舗装の劣化要因は、路床の支持力、舗装厚さ、切上・盛上、橋梁、トンネル、線形、勾配等の構造条件、砕石やアスファルトの種類等の材料条件、降雨、積雪、気候などの気象条件、大型車交通量といった交通条件、その他地域特有の条件が考えられる。これら全てをパラメータとして劣化予測を行う場合、信頼できる結果を得るためには膨大なデータが必要である。したがって、少ないデータから信憑性の高い劣化予測を実施して道路管理費用を推定するためには、地域に応じて必要なパラメータを取捨選択することが重要である。同様に、道路利用者費用、沿道住民の費用も地域特有の性質を有するため、全ての地域において共通の値を用いることはできない。こうしたことから、完成したシステムが存在したとしても、PMS を稼働させるためには運用するエリアでカスタマイズもしくは複雑なキャリブレーションをしなければ使いものにならない可能性が高い。

システムへの思いこみ

舗装の劣化は確定的な事象ではないため、PMS で算定する LCC は推定結果にすぎない。舗装の維持管理にかかる最終的な意志決定はあくまで道路管理者が下すという認識が欠けると、PMS を有効に活用することはできない。また、舗装の状態観察や将来予測のために収集した路面性状データ、舗装の修繕履歴データは PMS の構成要素であって、これらを収集することを PMS と誤解すると貴重なデータが生かされない。さらに、劣化予測や費用算出に必要なデータが全て揃うまで PMS を運用することができないという考えでは、システムは永久に構築されない³⁹⁾。

こうした PMS の問題を解決するためには、技術者や管理者の役割を明確にすること、マネジメントが実施されるレベル間の時間的・空間的な関係を明らかにすることが重要である。また、マネジメントの目的を理解した上で、必要な情報を効率的に収集し、舗装の健全性を評価する手法を確立することが必要である。さらに、PMS の運用に際しては、全てのデータ、完全なシステムが完成してから運用する”考えてから走り出す”のではなく、少ないデータを生かしてシステムを稼働させ、逐次改善を行う”歩きながら考える”という感性も管理者に求められる。

PMS の問題を解決する手段として、坂井ら⁴²⁾はロジックモデル（最終的な成果を設定し、それを実現するために具体的にどのような中間的な成果が必要か、さらに、その成果

を得るためには何を行う必要があるかを体系的に明示するブレイクダウン型思考ツール)を用いて高速道路の維持管理業務を体系的、組織的に整理し、PDCA サイクルを機能させる方法論を提案している。同手法は、”誰がどの技術の責任者か?”あるいは”何を改善すべきか?”といった情報を獲得する手段として有効であり、次項で示すアセットマネジメントの国際標準規格 ISO55000 シリーズの要求事項に適合したマネジメントツールとなりうる。システムの汎用性についても、現時点で獲得できる情報(路面性状データ、舗装台帳データ等)から必要なデータを取り出して劣化予測を行う統計的劣化予測手法の飛躍的な進歩により、LCC の計算や意思決定に有用な情報を提供する方法論も開発されている。これらを用いることにより、システムそのものの相違はあっても、比較的に簡単なカスタマイズで運用が可能になると考えられる。

2.3.5 ISO5500X との関係

ISO とは

国際標準化機構 ISO (International Organization for Standardization) は、日本規格協会 JSA (Japanese Standards Association) のような各国の代表的標準化機関を構成団体に持ち、電気および電子技術分野を除く全産業分野(鉱工業、農業、医薬品等)に関する国際規格を策定するための機関である。新たに ISO 規格を策定する場合、構成団体の何れかによる提案を受け、構成団体の投票によって新規規格策定の是非を判断する。策定が可決されれば ISO メンバー国代表が参加する技術委員会にて規格案を作成し、最終的にはメンバー国の投票を経て ISO 規格として発効する。ISO 規格を定める際には各国の国内規格に配慮しつつ、規格が策定されれば国内規格を ISO 規格に整合することとされている。

ISO5500X 提案の背景

ISO55000 シリーズ (ISO5500X) はアセットマネジメントの国際標準である。アセットマネジメントは保有する資産の効率的な管理のための手法であり、1980 年代から欧米で広まったとされる。同手法によるインフラの管理は、1980 年代初めに老朽化した道路橋の相次ぐ事故を経験したアメリカ、財政難の中で民間資金を投入してインフラの整備を行う PFI (Private Finance Initiative) 手法を考案して 1992 年に導入したイギリス⁴³⁾、ニューパブリック・マネジメント NPM (New Public Management) 手法の導入を積極的に進め

てきたオーストラリアやニュージーランド等で進展してきた。現在、計画・建設・維持・更新・廃棄のアセットライフ（ライフサイクル）全般にわたり、資産の価値、リスク、コストの最適化を図るためのツールへと同手法が進化あるいは拡張されており、進化の過程によってアセットマネジメントの考え方や手法も多様化していると考えられる。

近年、経済活動のグローバル化により、道路をはじめ鉄道や電力施設の建設市場に外国の企業が参入するケースが増えており、開発途上国のインフラ建設、維持管理に複数の国が関わっている。ところが、インフラ個別に各国のアセットマネジメント手法を導入すると、管理項目や管理目的の相違によりアセットマネジメントを実践するシステム AMS（Asset Management System）の汎用性が大きく損なわれ、インフラ群の管理ルールの設定やインフラの健全度の評価が極めて困難となることが予想される。こうしたことを踏まえ、アセットマネジメントの標準化の必要性から 2009 年 8 月にイギリス規格協会 BSI（British Standards Institution）より ISO に対して AMS を ISO 規格の新業務項目にする提案がされ、同年 12 月に可決された。BSI が提案した AMS は、アメリカ、イギリス、オーストラリアで既に採用されているアセットマネジメントの公開仕様書 PAS55（Publicly Available Specification）をベースとしているが、2014 年 3 月の国際規格発効に向けて全面的な見直し作業が進められている。

ISO5500X とマネジメントサイクル

ISO5500X の原案は、2010 年に設立されたプロジェクトコミッティー（PC251）が作成しており、2011 年 11 月時点で同委員会のコミッティードラフトは次の 3 つで構成されている。

ISO55000 アセットマネジメント- 概要、原則、用語

ISO55001 アセットマネジメント- マネジメントシステム- 要求事項

ISO55002 アセットマネジメント- マネジメントシステム-（ISO55001 のガイドライン）

PC251 では、ISO55001 における要求事項案として 7 項目（組織のコンテキスト、リーダーシップ、計画、サポート、運用、性能評価、改善）を示している。具体的には、組織のおかれている様々な状況（アセットマネジメントが必要な範囲、顧客の要望、コンプライアンス）を理解すること、トップマネジメントを採用して責任の所在を明らかにすること、リスクベースのマネジメント計画を立案すること、アセットマネジメントを実現するためのサポートを行うこと、アセットの変化やアウトソーシングに関して適切に運用すること、

アセットのモニタリング結果のレビューをすること、不具合箇所の是正や継続的な改善をすることを求めている。最も重要なことは、ボトムアップだけでなくトップダウンによるマネジメント技術の継続的な発展（改善）を要求していることである。

これを図-2.3 のマネジメントサイクルで実践するためには、次の点に留意する必要がある。階層的マネジメントサイクルにおけるマネジメント技術の改善は、下位のマネジメントサイクルから上位のサイクルへ積み上げるボトムアップ方式で遂行される。この方式では、各サイクルで生じた問題点を集約して改善するまでに多くの時間を要し、かつ問題解決の方向性が部門によって異なるという事態が生じることが懸念される。また、最下層のマネジメントサイクルでは、管理目標や技術的な基準の範疇で日常的な維持管理業務の最適化を図ることが目的である。点検頻度や補修に用いる材料の見直しなど維持管理予算に係わる大幅な改善を同サイクル内で決定・実施することは事実上不可能といえる。中層のマネジメントサイクルにおいても同様な問題が生じることが予想される。

したがって、継続的な改善のプロセスを階層的マネジメントサイクルに導入するためには、各マネジメントサイクルの事後評価を統括し、PDCA サイクルに改善点を反映させる上位のマネジメント機能が必要となる⁴⁴⁾。図-2.5 は、階層的マネジメントサイクルとこれをモニタリングしてサイクル全体を改善する上位のマネジメント（メタマネジメント）の関係を示している。メタマネジメントは、政策目標の達成度の評価、最終成果を達成するために体系づけられたアセットマネジメント活動のロジックの見直し、あるいは活動自体の見直しなど、マネジメントサイクルの評価機能と位置づけられる。

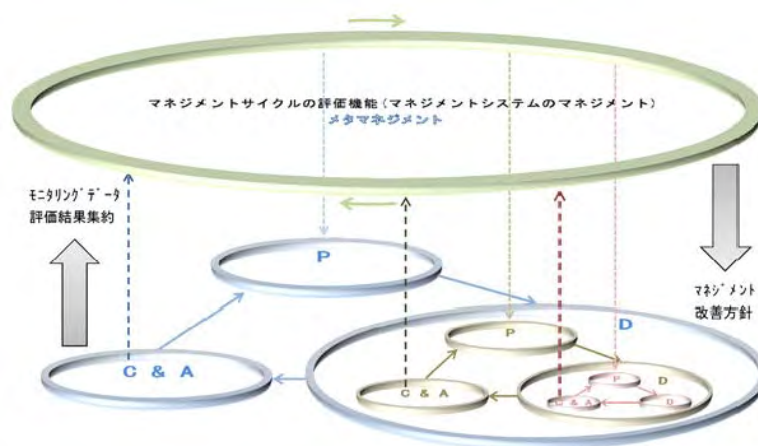


図-2.5 メタマネジメントシステム

2.4 舗装技術の継続的な改善

2.4.1 継続的な改善の必要性

舗装のアセットマネジメント手法は、増大した舗装ストックに対して、従来の対症療法的な維持管理ではなく予防的な維持管理を実施し、さらに維持管理の重要性を利用者である国民に説明する責任が必要であるという問題意識のもとに注目されてきた。坂井らが提案した手法は、従来のPMSで生じた問題を解決し、2014年に発効するISO5500Xの要求事項にも適合していることから、舗装アセットマネジメントを実践的に行うツールとして期待されている。

一方、図-2.6に示すように道路事業費は年々減少しており、アセットマネジメント手法を適用しても舗装の維持管理レベルを現況の水準で維持することは難しいと指摘されている⁴⁵⁾。優れた維持管理方策を提案しても、これを実行する予算が無ければマネジメントの効果が得られないことは言うまでもない。財政難に陥っている自治体では維持管理に十分な予算を確保できないため、舗装の劣化そのものを食い止めて目標の水準を維持する以外に有効な解決手段を見出すことができない。そのためには、地域特有の舗装の破損原因を究明し、舗装の耐久性向上に寄与する新たな舗装技術を開発・導入し、事後評価を実施して新たな問題が発見されればその原因を探るという舗装技術の継続的な改善のプロセスが必要である。なお、本プロセスを図-2.3の下位のマネジメントサイクルからボトムアップ方式で実践すると、効果が得られるまで多大な労力と時間を要する。アセットマネジメントの実践効果を効率的・効果的に得るためには、移り変わる経済情勢やアセット利用者の多様なニーズに迅速に応えることが求められる。したがって、舗装技術の継続的な改善は図-2.5のメタマネジメントで実践することが望ましい。

2.4.2 不完全な情報を活用した舗装技術の継続的な改善

我が国の舗装技術は、多くの施工実績を重ねる中、材料、施工機械の進歩により目覚ましい発展を遂げた。また、舗装構造、修繕履歴の情報や路面調査、構造調査のデータは、舗装の維持管理を実践する上で貴重な判断材料となり得た。これらの情報は舗装の将来予測に基づくLCC評価にも活用されている。ところが、修繕履歴の情報は、特定の条件で特定の材料や工法で修繕した結果であり、同じ条件で他の材料・工法を適用した結果が欠落した不完全な情報といえる。そのため、同情報を用いて確定的な舗装の劣化予測を行うこと

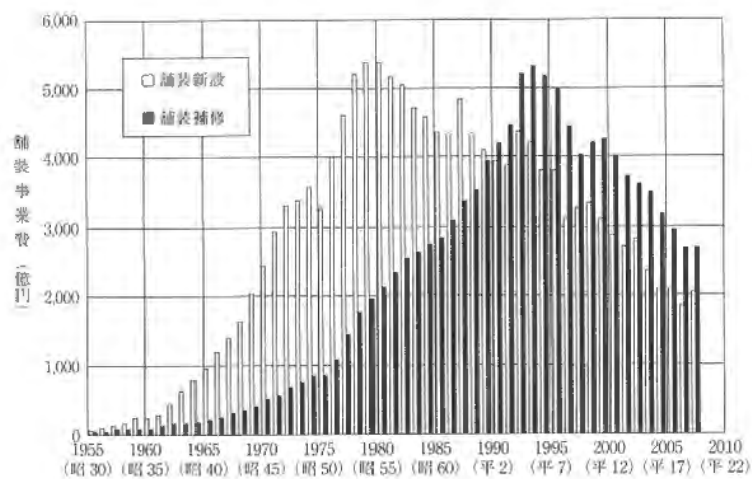


図-2.6 道路事業費の推移（一般道路事業）¹⁾

はできない。舗装の耐久性向上により限られた維持管理予算の中で舗装のサービス水準を確保するためには、不確実性を含む情報や知識に基づいて最適な工法や材料を選定しなければならない。本研究では、舗装技術の中でも維持・修繕に用いる舗装材料に着目し、不完全な情報を活用しながらこれを継続的に改善して舗装の耐久性向上を実現させるための方法論を提案する。

第3章 日常的な維持に用いる補修用常温混合物の耐久性評価

3.1 総説

道路管理者が実施する日常点検では、路上の落下物の撤去や路面の段差、ポットホール等路面の異常の緊急補修（維持）が行われる。舗装の維持には、走行時の安全性の確保、損傷範囲の拡大を防ぐことによる路面の延命化の効果がある。段差やポットホールの緊急補修には迅速な作業が要求されるため、これらの補修に際しては一般的に後述の補修用常温アスファルト混合物を用いる。ところが、同混合物が性能を発揮する前に補修箇所が破損するケースも多い。そのため、供用年数が長い舗装路面では緊急補修が必要な箇所の発生率が上昇すると考えられる。日常点検で補修可能な数量以上のポットホールが発生すれば、もはや維持では対応が困難であり、全面的な修繕が必要となる。

道路の日常点検では、落下物や損傷箇所等の障害物の有無に関係なく点検コストが生じる。点検コストを削減するためには、可能な限り点検間隔を長く設定する必要があるが、点検間隔が長くなれば落下物や損傷箇所に遭遇する道路利用者の数が増大し、事故発生リスクも上昇する。同リスクを軽減するためには、点検者の増員、パトロールの頻度を高くするなどの対応が必要であるが、必然的に点検コストが増加する。このように、点検コストと事故発生リスクの間にはトレードオフの関係が成立する。

道路管理者は点検予算の制約により十分な対応ができないとしても、事故が発生した場合は管理責任を負う。国家賠償法2条において、“道路、河川その他公の営造物の設置または管理に瑕疵があったために”生じた損害の賠償義務を規定している。設置または管理の瑕疵とは、道路、河川等の営造物が本来持つべき安全性を欠いていることをいい、安全性を欠いた原因については管理者に故意過失のあったことを必要としない無過失責任を課している。そのため、道路管理者は点検コストを抑えつつも事故発生リスクを軽減するような対策を講じなければならない。路面の偶発的な破損の発生を未然に防ぐ有効な手段が無いとすれば、破損の繰り返し発生を防ぐことが最も有効な対策といえる。したがって、補修箇所が早期に破損に至る原因を究明し、補修箇所の耐久性を向上させるように補修方法や補修用常温アスファルト混合物を継続的に改善することが道路管理者に求められる。

本章では、補修用常温アスファルト混合物の適性や補修箇所の耐久性を評価する方法論を提案するため、まず、市販されている同混合物を用いた室内試験法と試験条件を設定する。次いで、緊急補修の大半を占めるポットホールについて、その発生メカニズムを示し、ポットホール補修箇所の破損に影響すると思われる要因を整理し、これに基づいて日常点検シートを作成する。さらに、実証分析として実際の補修作業に点検シートを活用し、同集計データにワイブル劣化ハザードモデルを適用してポットホール補修箇所の耐久性に影響する要因を明らかにする。

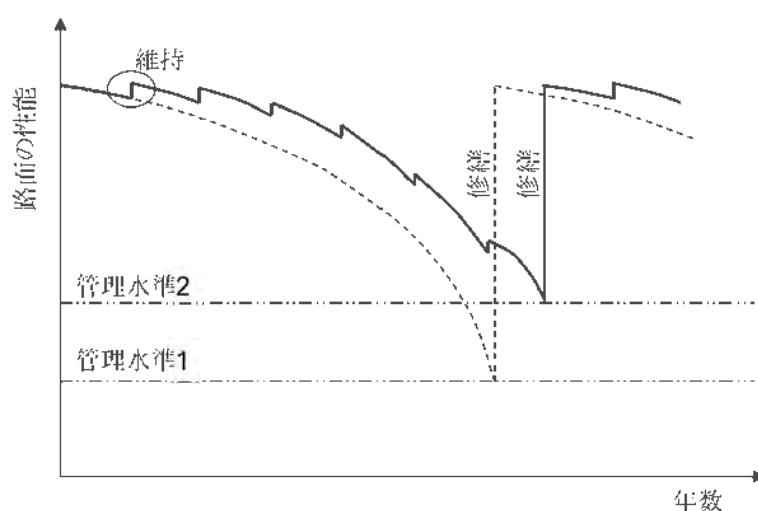


図-3.1 舗装の維持の効果

3.2 常温アスファルト混合物の室内試験

3.2.1 常温アスファルト混合物の特徴と用途

常温アスファルト混合物（以降、常温混合物と称す）は100℃以下で混合できるアスファルト混合物であり、一般的には粗骨材、細骨材にアスファルト乳剤を常温で混合したものとカットバックアスファルトを混合したものに分類されている。アスファルト乳剤を使用した常温混合物は、乳剤に含まれる水分が分解されることにより強度が発現して舗装体として安定するが、混合物の貯蔵が困難なため、通常、路上再生工法のように現場混合方式に用いられる。これに対しカットバックアスファルトを使用した常温混合物は、アスファルトに含まれる揮発成分の蒸散により安定するため、空気を遮断することで長期間の保存

が可能となる。そのため市販されている袋入りの常温混合物はこのタイプが多い。

このように、カットバックアスファルトを使用した常温混合物は加熱アスファルト混合物と比較して貯蔵や運搬の面で扱いやすいことから、ポットホールや段差等の小規模な緊急補修に適している。近年では、特殊樹脂を添加したものや骨材の粒度を調整して安定性や耐久性を高めた全天候型の常温混合物が開発されており、高い空隙を有する開粒度タイプ、密な構造となる密粒度タイプが市販されている。

3.2.2 室内試験の目的と試験項目

加熱アスファルト混合物の室内試験は、主に混合物の品質証明や新しい混合物と従来の混合物の性状の相対評価を目的として行われる。具体的には、混合物の安定性、耐流動性、耐摩耗性、たわみ追従性、はく離抵抗性等の物理性状を各種の試験装置を用いて評価する。常温混合物については、特に明確な品質基準は設定されていないものの、室内試験で同混合物の物理性状を評価する方法が提案されている⁴⁶⁾。ここでは、緊急補修時に求められる作業性、過酷な条件でも性能を発揮できる耐水性や耐久性を評価する試験を検討するが、試験の汎用性、経済性に配慮し、以下に示す既存の試験法を用いる。

アスファルト混合物の密度試験

アスファルト混合物の密度試験は、室内試験に用いる各混合物の供試体の基準密度を決定するために行うものである。所定量の混合物を計量し、表-3.1の条件で突き固めハンマを自由落下させて供試体を作製し、供試体厚さが同表の規格の範囲に入るまで、計量・作製を繰り返す。こうして条件を満たした供試体を用い、体積と質量を計測して供試体密度を算出する。

表-3.1 密度試験用供試体の作製条件

| 項 目 | 規格または条件 |
|-----------|--------------------------------|
| モールド内径、高さ | 内径 101.6±0.2mm, 高さ 88.9± 0.3mm |
| 突き固めハンマ質量 | 4.5kg |
| ハンマ落下高さ | 45.7cm |
| 突き固め回数 | 100 回（片面各 50 回） |
| 供試体厚さ | 63.5± 1.3mm |

ジャイレトリー試験機による締め固め試験

ジャイレトリー試験機による締め固め試験は、アスファルト混合物にニーディング作用を与えながら混合物の締め固め特性を評価するものである。図-3.2のような締め固め機構を有する装置を用い、モールド内に所定量の混合物を投入して载荷軸を介して载荷ヘッドから所定の圧力をかけ、モールド突起部をつり上げながら旋回させることにより旋回角度を維持しつつ供試体を締め固める。この方法は密度試験の重鎮を落下させて突き固める方法よりも車両による締め固めに近いとされている。また、ジャイレトリー試験機では旋回数毎に混合物層の厚さを出力するため、締め固め過程の混合物の圧密特性を評価することができる。本試験の締め固め圧力と旋回角度は 600kPa、1.25°を標準としている。

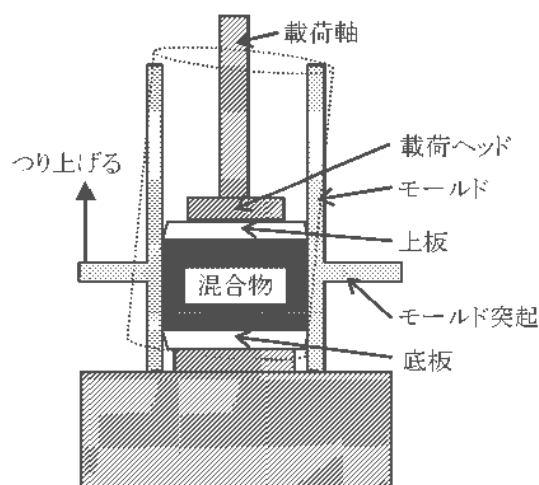


図-3.2 ジャイレトリー試験法の機構

マーシャル安定度試験

マーシャル安定度試験は、加熱アスファルト混合物の配合設計や品質管理を目的として行うものである。試験に際しては、アスファルト混合物の密度試験と同じ供試体を作製する。その後、供試体の密度を求め、試験開始 30 分前に 60℃の恒温水槽に供試体を浸し、試験開始直前に水槽から取り出す。取り出した供試体を図-3.3 のような装置に固定された円弧状の载荷ヘッド内に置き、毎分 5mm で载荷する。このときの最大荷重を安定度、最大荷重に達するまでの変形量をフロー値として求める。アスファルトは高温で粘度が低下するため、アスファルト舗装路面は夏季に流動や変形が生じやすい。マーシャル安定度試験はこうした変形に対する抵抗性を表すものとされる。また、60℃の恒温水槽に 48 時間浸した後、同試験を行う水浸マーシャル安定度試験では、上記の標準的なマーシャル安定度

と48時間水浸した後の安定度の比（残留安定度）を求める。残留安定度は、混合物の耐水性を評価する指標として用いられている。

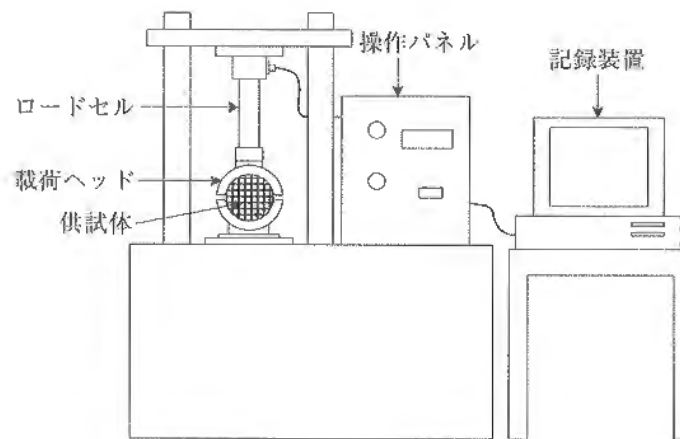


図-3.3 マーシャル安定度試験装置⁴⁷⁾

補修用常温混合物の一軸圧縮試験

補修用常温混合物の一軸圧縮試験は、常温混合物の強度特性の評価を目的として行うものである。試験用の供試体は、マーシャル安定度試験作製モールドおよび突き固めハンマを用いて厚さが $68.0 \pm 1.3\text{mm}$ となるように作製する。本試験では、モールドから取り出した供試体の密度を測定した後、毎分1mmで載荷し、最大荷重に達したときの変位量と等しい変位が得られるまで継続して行う。こうして最大荷重（一軸圧縮強さ）と2倍の変位量に達したときの荷重の最大荷重に対する割合（残留強度率）を求める。残留強度率は、締め固めた常温混合物に変形が生じた際の耐久性を示す指標とされている。

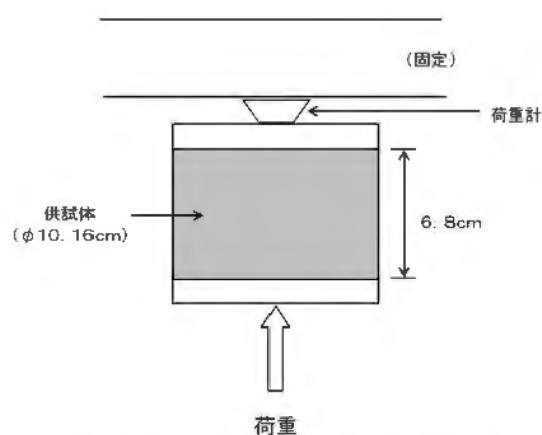


図-3.4 一軸圧縮強さの測定法

圧裂試験

圧裂試験は、アスファルト混合物の耐流動性やひび割れ性状の把握を目的として行われるものである。本試験では、一般的にマーシャル安定度試験用の供試体を用いて平滑な平面を持つ載荷板に供試体を置き、毎分 5mm で載荷して供試体が破断するまでの最大荷重と変位量を記録する。なお、ポットホール等の局所的な補修箇所では常温混合物に引張り応力が作用していると考えられることから、これを間接的に評価するため、ここでは図-3.5 のような曲面の載荷板を用いる。

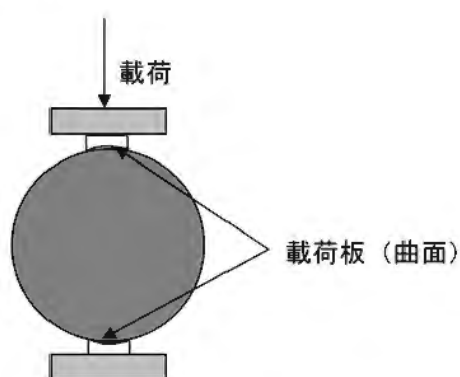


図-3.5 圧裂強度の測定法

3.2.3 室内試験の温度条件の設定

常温混合物の強度や安定度は、混合物に含まれる揮発成分の蒸散や特殊樹脂の硬化によって発現するため、温度や経過日数に依存する。常温混合物は 1 年を通じて路面の補修に用いられており、補修後の経過は、気象条件、路面温度、交通条件等に左右される。我が国では、冬季は路面が凍結して 0℃を下回り、夏季の炎天下で気温が 30℃を超えれば路面温度は 60℃以上に達することもある。

このように常温混合物が過酷な条件で用いられることを鑑みて、室内試験では複数の試験条件を設定する。表-3.2 の条件 1 は冬季、条件 2 は夏季の補修を想定したもので、供試体の作製温度を条件 1 は 5℃、条件 2 で 20℃としている。なお、アスファルトの粘度の温度依存性を考慮し、一定期間保管するものに関しては条件 1,2 の試験温度を統一している。そのため、試験温度と保管温度の異なる条件 2 では、保管後、別途試験温度で 5 時間養生することとした。一方、条件 3 では一軸圧縮強さや圧裂強度の温度依存性を評価するため、保管時に複数の温度条件を設定している。各試験のサンプル数は、いずれの条件も 1 混合物に対して 3 供試体である。

表-3.2 補修用常温混合物の室内試験条件

| | 条件 1 | | | 条件 2 | | | 条件 3 | | |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 試験温度 (℃) | 保管期間 (H) | 保管温度 (℃) | 試験温度 (℃) | 保管期間 (H) | 保管温度 (℃) | 試験温度 (℃) | 保管期間 (H) | 保管温度 (℃) |
| 密度試験 | 5 | - | - | 20 | - | - | - | | |
| 締め固め試験 | 5 | - | - | 20 | - | - | - | | |
| マーシャル安定度試験 | 60 | 7 | 5 | 60 | 7 | 60 | - | | |
| 軸圧縮試験 | 5 | 7 | 5 | 5 | 7 | 60 | 20 | 7 | 20,40,60 |
| 圧入試験 | 5 | 7 | 5 | 5 | 7 | 60 | 20 | 7 | 20,40,60 |

3.2.4 室内試験の事例

常温混合物の選定

室内試験で常温混合物の適性を評価するため、表-3.3 に示す 6 種類の常温混合物を選定した。表中の補修材 A,B,C は市販されているもの、D,E,F は開発中（選定当時）のものである。したがって、試験時期の異なる条件 1,2,3 で D,E,F の混合物は品質が同じとは限らないことに留意する必要がある。また、各条件の試験時期によっては調達不能であった混合物も存在する。

表-3.3 室内試験に用いる常温混合物

| 混合物名 | 細別 | 粒度 | 最大粒径 (mm) |
|-------|----------------|-----|-----------|
| 補修材 A | 特殊樹脂・改質アスファルト系 | 密粒度 | 7.5 |
| 補修材 B | カットバックアスファルト系 | 開粒度 | 5 |
| 補修材 C | 特殊樹脂・改質アスファルト系 | 開粒度 | 5 |
| 補修材 D | カットバックアスファルト系 | 開粒度 | 5 |
| 補修材 E | 特殊樹脂・改質アスファルト系 | 開粒度 | 5 |
| 補修材 F | 特殊樹脂・改質アスファルト系 | 密粒度 | 13 |

アスファルト混合物の密度試験結果

アスファルト混合物の密度試験は、各試験に用いる供試体の基準密度を決定するため、また、常温混合物の締め固め特性を評価するために実施した。図-3.6 に密度試験のフロー、表-3.4 に密度試験結果を示す。なお、常温混合物の質量は揮発成分の蒸散により変動すると予想されたため、供試体作製直後にモールドに入れたまま質量を測定し、事前に計測したモールドの質量との差から供試体の質量を求めた。また、供試体の体積は、モールドから抜き取った後にノギスで供試体の直径と厚さを計測して算出した。

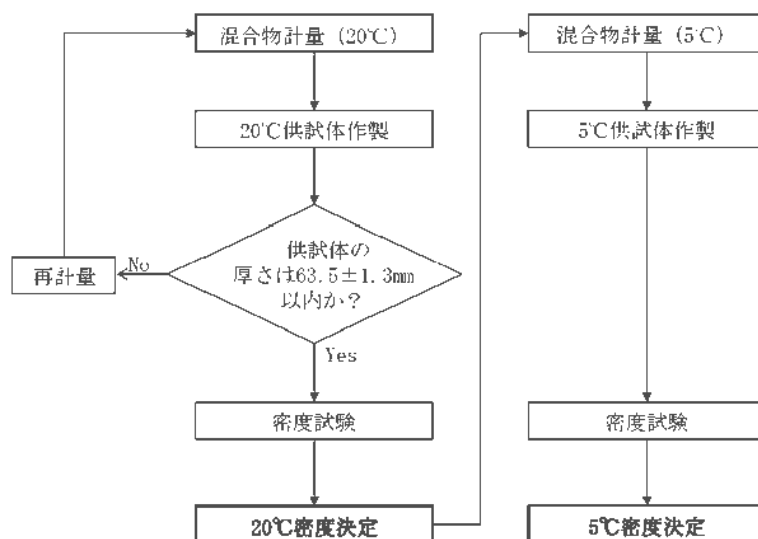


図-3.6 密度試験のフロー

表-3.4 常温混合物の密度試験結果

| 混合物名 | 最大密度 (g/cm^3) | 密度 (20℃) (g/cm^3) | 密度 (5℃) (g/cm^3) | 空隙率 (20℃) (%) | 空隙率 (5℃) (%) |
|-------|----------------------|--------------------------|-------------------------|------------------|-----------------|
| 補修材 A | 2.523 | 2.183 | 2.111 | 13.5 | 16.3 |
| 補修材 B | 2.372 | 1.964 | 1.923 | 17.2 | 18.9 |
| 補修材 C | 2.488 | 1.938 | 1.891 | 22.1 | 24.0 |
| 補修材 D | 2.409 | 2.085 | 2.004 | 13.4 | 16.8 |
| 補修材 E | 2.420 | 1.902 | 1.846 | 21.4 | 23.7 |
| 補修材 F | 2.513 | 2.329 | 2.291 | 7.3 | 8.8 |

常温混合物は自然な状態で敷き均し・締め固めが可能な混合物であるが、低温では加熱アスファルト混合物と同様にアスファルトの粘度が高くなるため、締め固めの作業性が低下すると考えられる。表-3.4 より、全ての混合物で5℃の密度が20℃の密度よりも小さいことが分かる。締め固め後の混合物の密度は、温度条件だけでなく使用骨材の比重や粒度に依存するため、密度の大小で締め固め作業性を評価することはできない。表の空隙率は、各供試体の密度と混合物の最大密度の比から算出した供試体の空隙の割合を表している。一般的なアスファルト混合物の空隙率の範囲は、密粒度混合物で4～8%程度、開粒度混合物で17～22%程度であり、補修材 B,D を除き、5℃条件では空隙率がこの範囲よりも大きい。

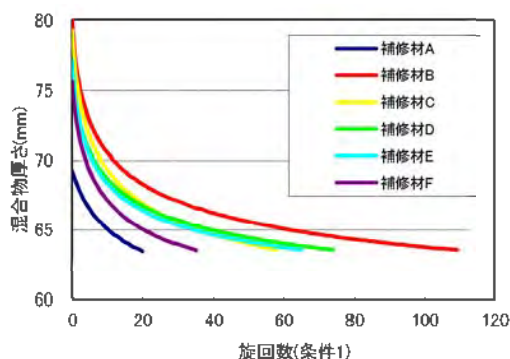


図-3.7 回転数と厚さの関係（条件1）

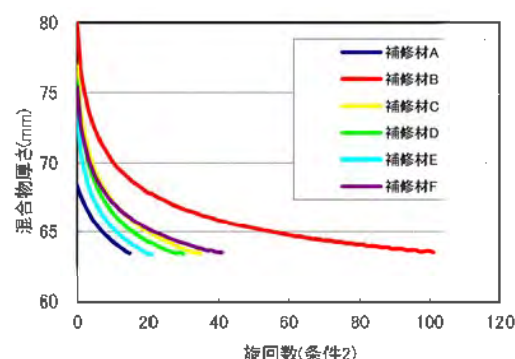


図-3.8 回転数と厚さの関係（条件2）

ジャイレトリ試験機による締め固め試験結果

本試験では、図-3.2 のモールド内で締め固めた混合物が 63.5mm の厚さ（マーシャル安定度試験と同じ厚さ）に達したときに表-3.4 の密度が得られるように事前に混合物を計量した。なお、試験装置は温度調整機能を有していないため、モールドならびに混合物は、作製温度と同じ温度に調整された恒温室にて5時間以上養生したものを用いた。図-3.7, 図-3.8 は各試験条件の回転数と混合物の厚さの関係、表-3.5 は各条件で 63.5mm に達するまでの回転数の平均値を示している。

表-3.5 63.5mm に達するまでの回転数

| 回転数 | 補修材 A | 補修材 B | 補修材 C | 補修材 D | 補修材 E | 補修材 F |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 条件 1 | 23 | 109 | 58 | 74 | 65 | 35 |
| 条件 2 | 18 | 100 | 33 | 27 | 23 | 39 |

表-3.5 より、補修材 C,E は条件 2 で所定の厚さに達するまでの回転数が有意に減少している。一方、補修材 A,B,F は試験条件による回転数の差は小さい。常温混合物の中には、交通荷重による締め固め効果を得ることを想定したものも存在する。車両のタイヤから受ける荷重はニーディングと同じ作用があり、本試験で回転数の少ない混合物は交通荷重による締め固め効果が期待できる。なお、条件 2 の試験時に入手した補修材 D の常温混合物は、条件 1 の試験時と比較して明らかに性状の違いが確認されたため、本試験以降、同混合物の条件 2,3 の試験結果は評価の対象から除外している。

マーシャル安定度試験結果

マーシャル安定度試験は、供試体の厚さが 63.5mm のときに表-3.4 の密度が得られるように事前に計量した混合物で作製した供試体の内、供試体厚さが 63.5 ± 1.3 mm のものを用いて実施した。表-3.6 に各常温混合物のマーシャル安定度試験結果を示す。

表-3.6 マーシャル安定度試験結果

| 評価項目 | | 補修材 A | 補修材 B | 補修材 C | 補修材 D | 補修材 E | 補修材 F |
|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 安定度 (kN) | 条件 1 | 0.32 | E | E | E | E | 1.8 |
| | 条件 2 | 0.52 | 1.2 | 3.7 | 1.1 | 2.0 | 2.5 |
| フロー (1/100cm) | 条件 1 | 18 | E | E | E | E | 19 |
| | 条件 2 | 14 | 16 | 19 | 16 | 21 | 19 |
| 残留安定度 (%) | | 86.6 | E | 73.9 | 62.8 | 65.6 | 92.8 |

注) 残留安定度は条件 2 のみ表記している。また、“E”は供試体崩壊により測定不能であったことを意味する

条件 1 において、マーシャル安定度試験を実施する直前に水浸させた結果、補修材 A, F を除く全ての混合物が試験開始までに水中で崩壊あるいは試験機に供試体を設置する段階で形状を維持できなくなり、試験を実施することが不可能であった。また、条件 2 では全ての混合物で試験が可能であり、加熱アスファルト混合物の安定度の基準値 (3.43kN) 以上の値が得られた混合物も存在したが、残留安定度の一般的な基準値 (75%) を A, F 以外全て下回った。

一軸圧縮試験結果

常温混合物の耐久性を評価する試験法が幾つか提案されている中で、常温混合物の一軸圧縮試験はセメント系常温混合物のセメント添加量の評価を目的として検討されたものである。常温混合物は、その特殊な使用環境において必ずしも強度が高ければ良いとは限らない。局所的な補修箇所では既設の舗装のように交通荷重を分散することができず、強度が低ければ繰り返し荷重を受けてひび割れが発生し、強度が高すぎれば荷重が既設舗装の一部に作用して既設舗装の損壊あるいは既設舗装との接着部からの剥脱が生じる。こうした点にも配慮して、本試験では一軸圧縮強さだけでなく残留強度率も導出している。図-3.9 に条件 1, 2、図-3.10 に条件 3 の試験結果を示す。

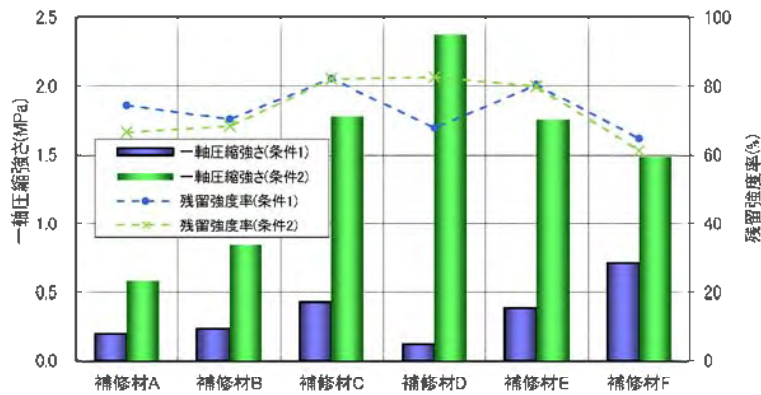


図-3.9 一軸圧縮試験結果（条件 1, 2）

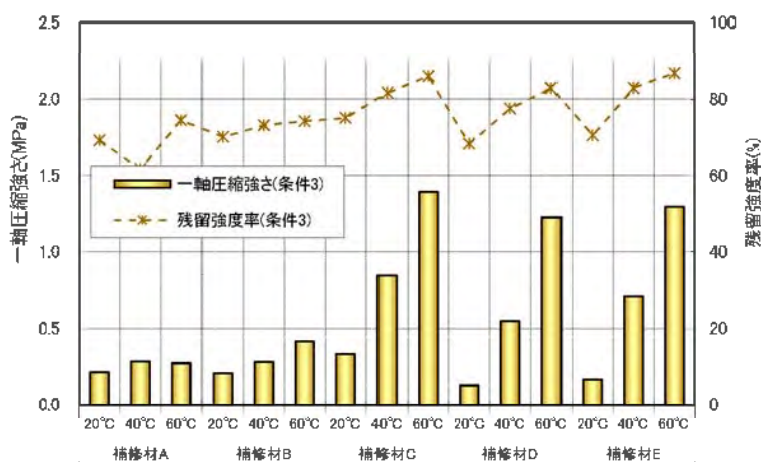


図-3.10 一軸圧縮試験結果（条件 3）

図-3.9 より、全ての常温混合物で条件 2 の一軸圧縮強さが条件 1 よりも大きく、特に C,E の混合物で顕著である。また、図-3.10 より、保管温度が高くなるにつれて一軸圧縮強さと残存強度率が上昇する傾向が見られる。なお、条件 3 の 60℃設定は、条件 2 と供試体の作製温度、保管期間、保管温度は同じで試験温度のみ異なる。条件 2 は条件 1 と試験温度を統一（5℃）しているが、条件 3 の試験温度は全て 20℃としている。補修材 F の常温混合物は、条件 3 の試験時に人手できず、同条件では 5 つの混合物で試験を実施した。

圧裂試験結果

本研究で採用した圧裂試験は、曲面を付けた載荷板を用いた間接引張試験である。本試験では、一軸圧縮試験と同様に条件 3 でも試験を行っている。図-3.11 に条件 1 と条件 2、図-3.12 に条件 3 の試験結果を示す。図-3.11、図-3.12 より、一軸圧縮強さと同様に圧裂強度も C,E の混合物で高い値を示しており、他の混合物も補修材 F 以外は条件 1, 2, 3 の

一軸圧縮強さと同じような大小関係が得られている。一軸圧縮強さは、アスファルトバイнда以外に骨材のかみ合わせの影響も受ける。補修材 F は他の常温混合物よりも最大粒径が 13mm と大きく、骨材のかみ合わせ効果が高い。一方、本試験の圧裂強度は引張り応力に対する耐久性を示すものであり、その効果はほとんど期待できない。

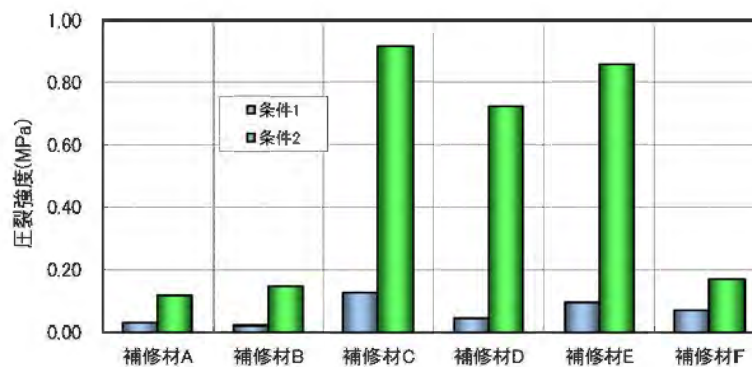


図-3.11 圧裂試験結果 (条件 1,2)

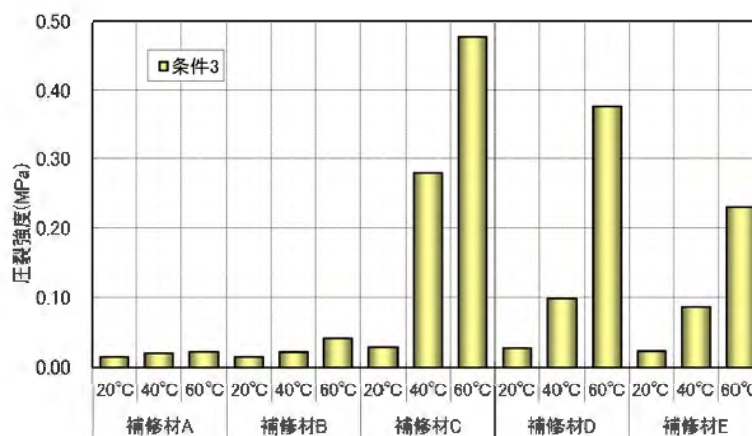


図-3.12 圧裂試験結果 (条件 3)

条件 3 の結果から、保管温度が 20℃ の場合は混合物による圧裂強度の違いは小さいが、同温度が高いほど各混合物の強度発現に差が生じている。補修箇所の耐久性と関係のある一軸圧縮強さ、圧裂強度は、補修後の温度条件に左右されること、混合物により明確な違いが生じることが 2 つの試験結果から分かる。

3.2.5 室内試験の考察

アスファルト混合物の室内試験は、コントロールされた条件で混合物の物理性状を評価するものであり、現道での挙動を必ずしも再現していない。複数の試験結果や各種条件で

試験した結果と照らし合わせて分析・評価することで室内試験の価値は高まると考えられる。こうした意味で課題が残されているものの、室内試験の結果から常温混合物に求められる3つの適性に関して以下の知見を得た。

作業性

常温混合物の作業性は、敷き均し、締め固め作業のしやすさである。低温ではアスファルトの粘度が高くなるため、同じ締め固め方法で所定の密度を得ることは難しい。その中で、カットバック系の補修材 B,D は、アスファルト混合物の密度試験において低温条件でも供試体の空隙率の目立った上昇は見られず、作業性に優れていると考えられる。また、本試験結果は、冬季における常温混合物の締め固め密度不足の問題が混合物を加温することで解決できることを示唆している。こうした工夫により常温混合物を十分に締め固めることができれば、補修箇所の耐久性向上にも寄与すると考えられる。一方、交通荷重による締め固めを想定した場合、混合物に求められる作業性は重要でない。ジャイレトリー試験機による締め固め試験では補修材 A,F が所定の密度に達するまでの旋回数（ニーディングによる締め固め）が少ない。ただし、交通解放後の車両による締め固めが十分に行われる前に補修箇所が破損する可能性があることに留意する必要がある。

耐水性

補修作業は、必ずしも晴天時に行われるとは限らない。また、作業時が晴天であっても、その前後に降雨等があれば、補修箇所は水の影響を受ける。とりわけ水が溜まりやすい場所（例えば、サグやクレストといった縦断勾配変化点、橋梁部等）においては、耐水性の高い混合物を選定することが望ましい。マーシャル安定度試験結果から、密粒度混合物の補修材 A,F は残留安定度が高く、耐水性が高いと認められる。一方、開粒度タイプの補修材 B,C,D,E は、水の影響を受けやすい。低温条件では強度の発現がそれほど期待できないため、上記の場所の補修でこれらの混合物を選定する際には細心の注意が必要である。

耐久性

本章の冒頭で述べているとおり、緊急補修箇所が増大すれば日常点検のコスト増となることから、道路管理者は常温混合物に求められる3つの性能の中で耐久性に最も関心を持っていると考えられる。一軸圧縮試験、圧裂試験において、補修材 C,E は、“最終的に”最も耐久性が高くなることが判明した。“最終的に”とは、その混合物が本来有する性能を発

揮した段階という意味である。耐久性の高い混合物を用いても補修後の早い段階で破損が生じる可能性もあり、耐久性の高い混合物を緊急補修に適用しても、補修後しばらくの間モニタリングを続けるべきである。

3.2.6 室内試験と現地調査による実証分析の関係

常温混合物の室内試験は、表-3.2のように、試験者が作り出した仮想的な条件の中で行われる。このようなコントロールされた状況で試験を行うことの意義は、混合物の物性の相対評価が可能であること、混合物が有する本来の性能を明らかにできることである。例えば、常温混合物の密度試験では、供試体作製時の温度条件を設定し、その条件で作業性の相対評価ができる。一軸圧縮試験や圧裂試験では、保管時の温度条件を複数設定することで、性能が最も発揮される条件とその強度という情報を得る。これらの情報を用いて、混合物の適性（作業性、耐水性、耐久性）を評価し、適材適所に用いることが補修箇所の耐久性向上につながる。一方、一連の室内試験結果を踏まえて常温混合物を現地に適用しても、混合物の性能が必ずしも発揮されるとは限らない。実際の補修作業には、施工の良否、天候、交通量、既設舗装の状態など、室内試験のようにコントロールできない不確実な要素が存在するため、本来の性能を発揮できず早期に破損することもある。したがって、早期破損の原因を究明するためには補修箇所の現地調査を行い、調査結果に基づいて補修方法や混合物を改善し、これを通じて常温混合物の本来の性能を発揮させるという一連のプロセス標準が必要となる。

ここで留意すべき点として、プロセス標準が完成した場合の室内試験の位置づけを考える。上記から、現地調査結果が蓄積されれば、室内試験を実施しなくても適性を評価できるという誤認が生じる可能性がある。現地のモニタリングでは、“ある常温混合物を用いて補修した”という事実と“その結果、1週間以内に損傷が生じた、あるいは生じなかった”という情報のみが得られ、“別の混合物を用いた場合の結果”という情報を入手することはできない。とりわけ不確実な要素が多数存在する中で、現地のモニタリングだけで混合物の適性を評価することは非常に困難であるといえる。室内試験で得た知見を適性の判定や材料基準として活用し、モニタリング結果から適用上の問題を明らかにし、問題解決のために開発された新たな常温混合物を室内試験で評価する、という相互関係を築くことで日常点検にかかる舗装材料の継続的な改善が実現するのである。

3.3 ワイブル劣化ハザードモデルを用いたポットホール補修箇所の 耐久性評価

3.3.1 ポットホールの発生と補修

日常点検におけるポットホール補修の位置づけ

前節では、緊急補修に用いる常温混合物の適性を評価するための室内試験について述べた。緊急補修が必要な路面の異常の発見とその補修は、路上の落下物の撤去と同様、日常点検における重要な業務の一つである。路面の異常には、段差、ひび割れ、ポットホール等があり、その中でもポットホールは発生頻度が高く、路面の異常の9割を占めるようなケースも存在する⁴⁸⁾。路面に発生したポットホールは、舗装の構造的な損傷を加速させるだけでなく、二輪車の転倒、乗用車のタイヤの破損やタイヤとられ等の事故にも関係すると考えられることから、道路管理者は安全性の確保のために常温混合物等を用いて迅速かつ適切に補修しなければならない。ところがポットホール補修箇所では、充填した常温混合物の剝脱によって再度ポットホールを形成することも少なくなく、同一箇所で繰り返し発生するポットホールにより日常点検業務に支障をきたすことが懸念される。こうしたことから、ポットホールの再発を防ぐような対策を講じて補修箇所の耐久性向上を図り、日常点検業務の負担を軽減することが求められる。

ポットホール発生過程

ポットホールの代表的な発生要因は、“オイルドロップ”、“損傷箇所の拡大”、“路面の滞水”である。車両の燃料漏れなど何らかの原因でアスファルト舗装面にガソリンや軽油が付着するとアスファルトが溶け出す“カットバック”が生じる。その結果、骨材を被膜しているアスファルトが流れ出して骨材間の付着力を失い、交通荷重を受けて骨材が飛散してポットホールが発生する。また、路面のひび割れや局所的な破損が生じている箇所に交通荷重を受けると、最も弱い箇所から骨材が飛散してポットホールを形成することもある。さらに、滞水状態の路面では交通荷重を受けて骨材のアスファルト被膜の内側に水が進入し、骨材間の付着力が時間の経過とともに失われ、骨材からアスファルトがはく離してポットホールが形成される。このはく離（Stripping）のメカニズムは、水浸ホイールトラッキング試験で再現できることが山田らにより示されており⁴⁹⁾、同試験結果から路面の

滞水がポットホール発生の主要な要因であることが明らかにされている。

以上の3つの要因について、オールドロップに関しては発生時期を予想することができないため、事後対策（路面洗浄、汚染部の撤去）が重要になる。また、路面のひび割れや軽微な損傷に関しては予防的な維持が効果的である。近年、付着性の高いアスファルトバインダが開発されており、同バインダを用いたアスファルト混合物を舗装の修繕工事に適用することにより、滞水に起因するポットホールの抑制効果が期待できる。ただし、ポットホールの問題解決のため直ちに全面的な修繕を実施することは現実的でなく、路面の滞水を前提としてポットホール補修箇所の耐久性向上に寄与するような維持管理法を検討することが重要であると考えられる。

ポットホール補修箇所の観察

舗装は走行車両の荷重を面で受けて下層に分散する構造を有しており、通常、路面の状態が短期間で急激に悪化することは少ない。一方、ポットホール補修箇所では荷重が補修箇所に集中するため、既設舗装よりも強度が劣れば変形や摩耗、強度が高ければ常温混合物と既設舗装界面からの剥脱や既設舗装の破壊が生じる。また、補修箇所に雨水が流入すれば耐荷力の低下の原因となる。図-3.13は、ポットホール補修箇所の代表的な破損形態を示している。

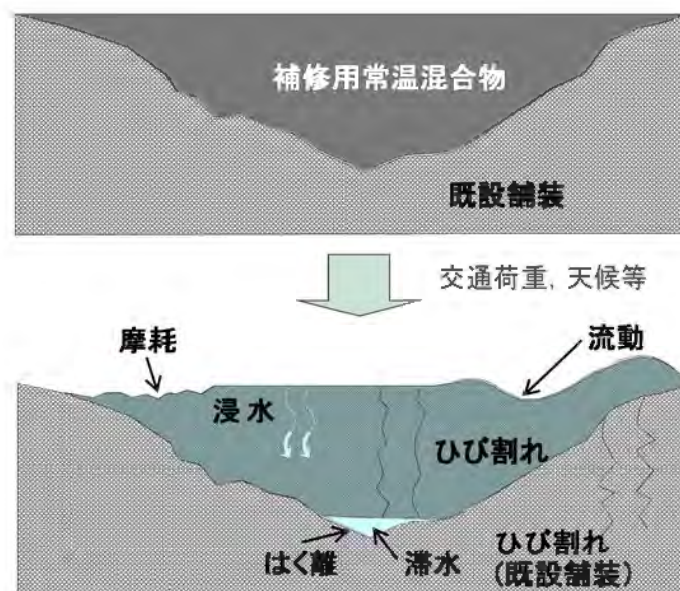


図-3.13 ポットホール補修箇所の破損形態

日常点検において、道路管理者は補修箇所には破損が生じているかどうかの経過観察を行い、常温混合物が剥脱するなど補修箇所の損傷が著しい場合には再度補修を行う。この補修は、全面的な修繕が施されるまで繰り返される。この時間的な流れを図-3.14に示す。 τ_a はある地点で初めてポットホールが観察された日付、 τ_b は同一箇所再度補修した日付、 τ_c は更にもう一度補修した日付、 τ_d は最近に観察した日付を表している。ここでは、補修箇所が破損して（すなわち寿命に達して）再び補修されるまでの期間をサイクルと呼び、そのサイクルが確定したものを完全サンプル、まだ寿命に達しておらずサイクルの期間が明確でないものを不完全サンプルと称す。図より、第1、2サイクルは寿命が確定した完全サンプルであり、第1サイクルの寿命は $\tau_b - \tau_a$ 、第2サイクルの寿命は $\tau_c - \tau_b$ となる。ただし、厳密には第1、2サイクルで寿命に達した時刻と点検時刻には差異があることに留意する必要がある。

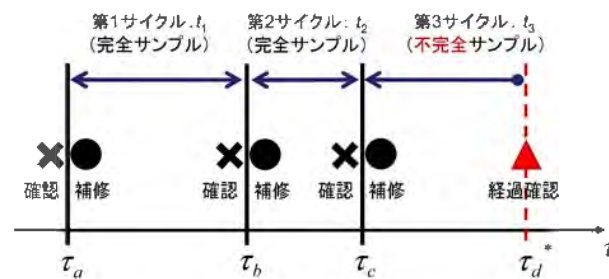


図-3.14 完全サンプルと不完全サンプル

ポットホール補修と耐久性

日常点検において、ポットホールの繰り返し補修の負担を軽減するためには、ポットホール補修箇所が破損する要因を明らかにして補修箇所の耐久性向上に資する対策を講じなければならない。ここでは、外的要因である舗装の構造条件、内的要因である補修時の施工条件を図-3.13の破損形態を参照して整理する。

舗装の構造条件 ポットホールが発生した既設舗装の構造条件が早期破損の要因であると考えた場合、図-3.13の破損形態と関連づけることができるものとして、舗装の種類、舗装下部の構造（トンネル、橋梁、切上部、盛土部）、線形条件（縦断勾配、横断勾配、直線部、曲線部）、地形（山間部、市街地、平野部）、また地域固有の条件として融雪散水装置の設置の有無等がある。

補修時の施工条件 補修時の施工条件は、補修作業の良否や作業環境が早期破損につながる
と考えたものである。具体的な例として、常温混合物の種類、締め固め方法、作業時
間、補修前の事前処理（水、埃の除去）ポットホール寸法の寸法（面積、深さ）、施工時
の気象条件（天候、気温、降雨の有無）等がある。

3.3.2 ポットホール再発生しやすさへのワイブル劣化ハザードモデルの適用

既往の研究との関係

ハザードモデルは、信頼性解析の分野で施設や機械の寿命を予測するモデルとして開発
されたものであり、同分野の他にも多くの分野で活用されている。ワイブル劣化ハザード
モデルは、劣化状態が「正常に機能している」か「寿命に達している（故障している）」の
2 値状態で示されるような施設等で、最も弱い箇所が故障することにより全体が故障に至
るような事象を対象とした場合に有効であり、こうした事象に関して幾つかの研究結果が
報告されている。例えば、Shin&Madanat⁵⁰⁾は、舗装にひび割れが発生する時期を予測す
るためのワイブル劣化ハザードモデルを提案している。また、青木ら⁵¹⁾は、トンネル照明
を対象として同モデルの有効性について実証分析を踏まえて検証している。さらに、Liら
⁵²⁾は、施設の劣化の異質性を考慮したモデルを提案し、津田ら⁵³⁾はモデルを適用する
際のデータが不足している場合においても、技術者の経験情報を活用することによりモデ
ルの推計精度を向上させるベイズ推計の有効性の検討を行っている。

本研究においてもポットホール補修箇所が寿命に達する過程をワイブル劣化ハザードモ
デルを用いて表現するが、従来の研究のように既存のデータを用いて解析するのではなく、
補修箇所が早期に寿命に至る要因を列挙し、点検シートを作成してデータ収集を行い、同
データから最も補修箇所の劣化を説明できる最適なモデルを推計して早期破損の原因を究
明し、改善の方向性を示すという問題解決型の思考を重視している。

ワイブル劣化ハザードモデルの定式化

ポットホール補修箇所から常温混合物が剥脱してポットホールが再発生する過程をワイ
ブル劣化ハザードモデルで表現するため、ある道路区間で発生したポットホールが常温混
合物で補修された後、同一地点で再度ポットホールが発生するまでの期間を寿命とみなす。
モデル化に際しては、まず、補修箇所の寿命を確率変数 ζ で表し、確率密度関数 $f(\zeta)$ 、分

布関数（累積寿命確率） $F(\zeta)$ に従って分布すると仮定する．ただし，寿命 ζ の定義域は $[0, \infty)$ である．このとき，補修直後の初期時点から任意の時点 $t \in [0, \infty)$ まで，ポットホールが再発生しないで補修箇所が生存する確率（以降，生存確率と称す） $\tilde{F}(t)$ は，全事象確率 1 から時点 t までにポットホールが再び発生する（混合物がはく脱して寿命に達する）累積寿命確率 $F(t)$ を差し引いた値

$$\tilde{F}(t) = 1 - F(t) \quad (3.1)$$

と定義できる．ここで，補修箇所が時点 t まで生存し，かつ期間 $[t, t + dt]$ 中に寿命に達する確率 $P(t \leq \zeta < t + dt | \zeta \geq t)$ は，

$$\begin{aligned} P(t \leq \zeta < t + dt | \zeta \geq t) &= \frac{P(t \leq \zeta < t + dt, \zeta \geq t)}{P(\zeta \geq t)} \\ &= \frac{P(t \leq \zeta < t + dt)}{P(\zeta \geq t)} \\ &= \frac{F(t + dt) - F(t)}{1 - F(t)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

と表せる．さらに，

$$h(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t \leq \zeta < t + dt | \zeta \geq t)}{dt} \quad (3.3)$$

とすると，(3.2) より，

$$\begin{aligned} h(t) &= \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{F(t + dt) - F(t)}{dt} \cdot \frac{1}{1 - F(t)} \\ &= \frac{f(t)}{1 - F(t)} \\ &= \frac{f(t)}{\tilde{F}(t)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

の関係が成立する．補修箇所が時点 t まで生存し，かつ当該時点でポットホールが再発生する確率密度 $h(t)$ は「ハザード関数」または「故障率」と呼ばれる．式 (3.1) の両辺を t に関して微分すれば，

$$\frac{d\tilde{F}(t)}{dt} = -f(t) \quad (3.5)$$

を得る．また，式 (3.4) は

$$h(t) = \frac{f(t)}{\tilde{F}(t)} = \frac{d}{dt} \left(-\log \tilde{F}(t) \right) \quad (3.6)$$

と変形できる．式 (3.6) を積分すれば，

$$\int_0^t h(u) du = -\log \tilde{F}(t) \quad (3.7)$$

より、時点 t まで補修箇所が生存する確率は、ハザード関数を用いて、

$$\tilde{F}(t) = \exp \left[- \int_0^t h(u) du \right] \quad (3.8)$$

と表される。したがって、ハザード関数の関数形が判明すれば、補修箇所の生存確率 $\tilde{F}(t)$ 、さらに、 $\tilde{F}(t) = 1 - F(t)$ より累積寿命確率 $F(t)$ を求めることができる。

ここで、ハザード関数が以下のようなワイブル劣化ハザード関数

$$h(t) = \gamma m t^{m-1} \quad (3.9)$$

で示されるケースを考える。ただし、 m はポットホールが再発生する確率の時間依存性を表す形状パラメータ、 γ はポットホール再発生の頻度を表す定数パラメータである。 γ が道路区間の構造特性や常温混合物の剥脱に寄与するような特性で表現できると考えれば、特性ベクトル $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_G)$ と未知パラメータベクトル $\boldsymbol{\eta} = (\eta_1, \dots, \eta_G)$ を用いて、

$$\gamma = \mathbf{y} \boldsymbol{\eta}' \quad (3.10)$$

と表せる。なお、 $y_g (g = 1, \dots, G)$ は g 番目の特性変数の観測値、 $\eta_g (g = 1, \dots, G)$ は、 y_g の係数（未知パラメータ）である。また、 $\boldsymbol{\eta}'$ は $\boldsymbol{\eta}$ の転置行列である。常温混合物の生存確率 $\tilde{F}(t)$ 、常温混合物の寿命の確率密度関数 $f(t)$ は (3.5)、(3.9) より、それぞれ

$$\tilde{F}(t) = \exp(-\gamma t^m) \quad (3.11)$$

$$f(t) = \gamma m t^{m-1} \exp(-\gamma t^m) \quad (3.12)$$

となる。

モデルの未知パラメータ推計

観測情報に基づいてワイブル劣化ハザード関数の未知パラメータ $m, \boldsymbol{\eta}$ を推計するため、各補修箇所の補修直後の時点を $t = 0$ と基準化し、補修箇所 $i (i = 1, \dots, n)$ の耐用期間の実測値を \bar{t}_i と表す。以下、記号「 $\bar{\cdot}$ 」は実測値であることを表す。モニタリング期間中に常温混合物が剥脱して補修箇所が寿命に達した場合、供用期間と寿命が一致し、 $\bar{t}_i = \zeta_i$ が成立する。一方、補修箇所が寿命に達していない場合、補修箇所の供用期間は観測期間長

\bar{T}_i と一致し、寿命 ζ_i は観測期間長を超えることが確定する。そこで、補修箇所 i の寿命が観測期間を超えるかどうかを表すダミー変数 \bar{d}_i を

$$\bar{d}_i = \begin{cases} 1 & \bar{t}_i = \zeta_i \leq \bar{T}_i \text{ の時} \\ 0 & \zeta_i > \bar{T}_i = \bar{t}_i \text{ の時} \end{cases} \quad (3.13)$$

と定義する。また、補修箇所 i の観測情報を $\bar{\mathbf{v}}_i = (\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i)$ と整理する。ここで、ワイブル劣化ハザードモデルの未知パラメータベクトル $\boldsymbol{\omega} = (m, \boldsymbol{\eta})$ を定義する。さらに、 $f(t_i), \hat{F}(t_i)$ が常温混合物の特性データ \mathbf{y}_i 、未知パラメータベクトル $\boldsymbol{\omega}$ の関数であることを示すために、 $f(t_i, \mathbf{y}_i; \boldsymbol{\omega}), \hat{F}(t_i, \mathbf{y}_i; \boldsymbol{\omega})$ と表記する。いま、補修箇所 i において $\bar{\mathbf{v}}_i = (\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i)$ が観測されたと仮定する。このとき、寿命 ζ_i の分布が \bar{T}_i で切断する条件（寿命に達しているもしくはは生存している）を考慮した補修箇所 i の条件付確率は、

$$\ell(\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega}) = f(\bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega})^{\bar{d}_i} \hat{F}(\bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega})^{1-\bar{d}_i} \quad (3.14)$$

と表される。右辺第1項はポットホールが再発生してモニタリングの期間が終了し寿命が \bar{t}_i となる確率、第2項は補修箇所の寿命が観測期間長 \bar{T}_i （すなわち、使用期間長 \bar{t}_i ）より長くなる確率を表している。各補修箇所の破損が互いに独立に生じていると仮定すると、尤度関数は、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\boldsymbol{\omega}|\bar{\mathbf{v}}) &= \prod_{i=1}^n \ell(\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega}) \\ &= \prod_{i=1}^n f(\bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega})^{\bar{d}_i} \hat{F}(\bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega})^{1-\bar{d}_i} \end{aligned} \quad (3.15)$$

と表すことができる。ただし、式 (3.15) の $\bar{\mathbf{v}} = (\bar{\mathbf{v}}_1, \dots, \bar{\mathbf{v}}_n)$ である。最尤推定法では、同式の対数尤度関数

$$\begin{aligned} \ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\omega}|\bar{\mathbf{v}}) &= \sum_{i=1}^n \bar{d}_i \ln [f(\bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega})] + \sum_{i=1}^n (1 - \bar{d}_i) \ln [\hat{F}(\bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega})] \\ &= \sum_{i=1}^n \bar{d}_i \ln [h(\bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega})] + \sum_{i=1}^n \ln [\hat{F}(\bar{t}_i, \bar{\mathbf{y}}_i; \boldsymbol{\omega})] \end{aligned} \quad (3.16)$$

を最大にするようなパラメータ値 $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ を最尤推定量として求める。式 (3.16) を最大にするパラメータ値 $\boldsymbol{\omega}$ の最尤推計量は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\omega})}{\partial \omega_g} &= 0, \\ (g &= 0, \dots, G) \end{aligned} \quad (3.17)$$

を同時に満足するような $\hat{\omega} = (\hat{\omega}_0, \dots, \hat{\omega}_G)$ として与えられる。ただし、 $\hat{\omega}_0 = \hat{m}, \hat{\omega}_g = \hat{\eta}_g (g = 1, \dots, G)$ である。さらに、パラメータの共分散行列の漸近的推計量^{56) 57)} $\hat{\Sigma}(\hat{\omega})$ は、

$$\hat{\Sigma}(\hat{\omega}) = \left[\frac{\partial^2 \ln \mathcal{L}(\hat{\omega})}{\partial \omega \partial \omega'} \right]^{-1} \quad (3.18)$$

と表すことができる⁵⁵⁾。上式の右辺は $\partial^2 \ln \mathcal{L}(\omega) / \partial \omega_i \partial \omega_j$ を要素とする $(G+1) \times (G+1)$ 次の Fisher 情報行列⁵⁶⁾ の逆行列である。最尤推定量 $\hat{\omega}$ が求められれば、 $\hat{\Sigma}(\hat{\omega})$ より t -検定統計量の推計も可能である。

3.3.3 実証分析

対象路線の概要とポットホール発生状況

ポットホール補修箇所の耐久性を評価するために、国土交通省近畿地方整備局豊岡河川国道事務所の八鹿国道維持出張所管内の国道（対象延長：71.1km）で発生したポットホールに着目する。当該国道において平成19年6月から平成22年2月までに自然発生したポットホールを常温混合物で応急補修し、その後の補修箇所の経過を観測した。ポットホールを含む路面異常の補修や路上落下物の除去を目的として、平日は1日1回、休日は上記のいずれかに1日1回の頻度で日常点検が実施された。点検中にポットホールを確認した場合、点検車両に積載している常温混合物で緊急補修が行われる。補修作業時は片側交互通行となるため、交通流に支障を来さないような配慮、ドライバーへ注意喚起が不可欠である。とりわけ当路線はスキー場へのアクセス道路となっていること、また、比較的に大型車の交通量も多いことから、迅速な作業、交通開放が要求される。こうしたことから、同地域における緊急補修は十分な効果が得られにくい状況にある。

実証分析では、ポットホール補修箇所の早期破損に至る原因を究明するため、既存の補修記録の記載内容や先に示した外的要因・内的要因を踏まえて図-3.15のポットホール点検シートを新たに作成して情報収集を行い、表-3.7の項目でデータベース化した。これらを集計した結果を表-3.8および表-3.9に示す。表-3.8は構造条件、表-3.9は施工条件に着目してポットホールの発生数と補修箇所の平均寿命を整理している。なお、表-3.7の9) 大型車交通量、15) 作業時の気温、16) 作業時間、17) ポットホール面積、18) ポットホール深さは、定量的なパラメータのため、同集計結果は記載していない。

全体的な特徴として、ポットホールは観測期間内に199地点で合計404個発生し、補修箇所の平均寿命は、不完全サンプルを含む場合は212.7日、不完全サンプルを除外した場

ポットホール調査・補修帳票(☑ 試験施工箇所 ・☐ 自然発生箇所)

| | | | | | | | | |
|---|---|------------------------|--|---|--|------------------------|-----------|--|
| 位置情報 | ID | 地方整備局 | 事務所 | 出張所 | 路線番号 | 上り・下り | 車線数 | |
| | 4 | 近畿 | 豊岡河川国道 | <input checked="" type="checkbox"/> 八鹿国道維持 <input type="checkbox"/> 朝来国道維持 | 9 | 下り | 2 | |
| | 距離標(km) | 距離(m) | ポットホールの位置 | | 合材種類(表層) | 合材種類(基層) | | |
| | 140 | | <input checked="" type="checkbox"/> 走行車線 <input type="checkbox"/> 追越車線 | <input type="checkbox"/> 進行方向右側 <input checked="" type="checkbox"/> 進行方向左側 | 密粒 | | | |
| 補修状況 | 構造物 | | 交差点の有無 | | 道路線形 | | 道路勾配(%) | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> 土工部 <input type="checkbox"/> 鋼床版 <input type="checkbox"/> CO床版 | | <input type="checkbox"/> 交差点部 <input checked="" type="checkbox"/> それ以外 | | <input type="checkbox"/> カーブ部分 <input checked="" type="checkbox"/> 直線部分 | | 2 | |
| | ポットホール発生日 | | 補修作成日 | | 補修面積(m ²) | | 補修深さ(mm) | |
| | 2007/02/13 | | 2007/02/13 | | 1.2 | | 36 | |
| | 施工日時 | | 補修材料名(製品名) | | | | | |
| | 2007/02/13 14:15:00 | | | | | | | |
| | 天候 | 気温(℃) | 作業時間(分) | 散水状況(融雪用)の有無 | | | | |
| | 晴れ | 12 | 10 | <input checked="" type="checkbox"/> 散水有り <input type="checkbox"/> 散水無し | | | | |
| | ポットホール内の水の有無 | | | 施工時に融雪装置からの水の対応 | | | | |
| | <input type="checkbox"/> 施工時に水を除去した <input checked="" type="checkbox"/> 施工時に水を除去しない <input type="checkbox"/> 施工時に水はなかった | | | <input checked="" type="checkbox"/> 何もしない <input type="checkbox"/> 堰を作って遮断した | | | | |
| ポットホール内の泥の有無 | | | 施工性について | | | | | |
| <input type="checkbox"/> 施工時に泥を除去した <input type="checkbox"/> 施工時に泥を除去しない <input checked="" type="checkbox"/> 施工時に泥はなかった | | | <input checked="" type="checkbox"/> 施工しやすい <input type="checkbox"/> 施工にくい <input type="checkbox"/> ふつう | | | | | |
| 施工後の状況 | 日時1 | 割削面積1(m ²) | 割削深さ1(mm) | ひびわれ1 | 日時2 | 割削面積2(m ²) | 割削深さ2(mm) | ひびわれ2 |
| | | | | <input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し | | | | <input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し |
| | 日時3 | 割削面積3(m ²) | 割削深さ3(mm) | ひびわれ3 | 日時4 | 割削面積4(m ²) | 割削深さ4(mm) | ひびわれ4 |
| | | | | <input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し | | | | <input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し |

図-3.15 ポットホール点検シート

合は54.0日であった。ここで、表-3.8の構造条件の相違によるポットホールの発生状況と補修箇所の平均寿命に着目する。2) 表層の種類と平均寿命の関係をみると、対象路線に占める密粒度舗装区間の割合は67%で排水性舗装の26%と比較して大きい。ポットホールの総発生数は約7.5倍(355/47)と顕著な差が生じている。1) 道路構造物については、土工部のポットホール総発生数がコンクリート床版部よりも圧倒的に多いことが確認できるが、これは道路延長に占める土工部の割合が多いことによるものと考えられる。事実、両者の同一地点における平均発生回数や平均寿命には有意な差は認められない。また、表層の種類以外では、3) 融雪散水装置の有無、4) 管理地域区分、7) 走行位置区分において、発生回数や平均寿命に相違が見られる。ただし、密粒度舗装区間では融雪散水装置が設置されており、排水性舗装区間では融雪散水装置が設置されていないことに留意する必要がある。一方、表-3.9をみると、全体的な傾向として施工条件の相違により平均寿命に顕著な違いが現われている。特に、融雪散水の有無が補修箇所の耐久性に影響を及ぼすことが平

表-3.7 ポットホール補修データベースの主要な記載項目

| 構造条件 | | 施工条件 | |
|------|-----------|------|-----------------|
| 番号 | 状 態 | 番号 | 状 態 |
| 1) | 道路構造物 | 10) | ポットホール内の水の除去の有無 |
| 2) | 表層の種類 | 11) | ポットホール内の泥の除去の有無 |
| 3) | 融雪散水装置の有無 | 12) | 融雪散水の有無 |
| 4) | 管理地域区分 | 13) | 締め固め方法 |
| 5) | 車線情報 | 14) | 常温混合物の種類 |
| 6) | 道路の平面線形 | 15) | 作業時の気温 |
| 7) | 走行位置区分 | 16) | 作業時間 |
| 8) | 同一箇所発生回数 | 17) | ポットホール面積 |
| 9) | 大型車交通量 | 18) | ポットホール深さ |

均寿命 2（完全サンプル）の結果から明らかである。本集計結果から、常温混合物が持つ本来の性能を発揮できないケースが存在すること、施工条件が良好であれば現状の常温混合物の耐久性に問題が無いことが分かる。

月別のポットホール発生数および平均寿命を図-3.16 に示す。棒グラフはポットホール発生数、折れ線グラフは平均寿命の日数を表している。例年、ポットホール発生数は降雪時期の 1 月から 2 月にかけて多い。また、6 月と 7 月にも発生数がやや増加傾向にあるが、これは梅雨と関連していると考えられる。ただし、補修箇所の平均寿命（不完全サンプル含む、除外の両方）については、冬季や梅雨時期とそれ以外の時期で傾向を読み取ることができない。

ここまで示してきた実証分析の平均寿命は、不完全サンプルの取り扱いを簡素化して平均寿命を確定的に算出している。構造条件や施工条件が補修箇所の寿命の長さにとどの程度影響しているかを分析するためには、ハザードモデルのような確率モデルを用いた詳細な統計分析が必要である。次に、ワイブル劣化ハザードモデルを適用した分析結果を示す。

ハザードモデル適用のための 1 次分析

表-3.7 に示しているように、実証分析では補修箇所の耐久性に影響を及ぼす要因として 9 つの構造条件、施工条件を選定しているが、これらの条件の中には相関関係を見逃すことができない要因が存在している可能性がある。ハザードモデルの特性変数を構造条件や施工条件で表現する際、特性変数に相関関係が大きいパラメータが複数含まれると安定的な推計値

表-3.8 ポットホール発生状況の概要（構造条件）

| 構造条件 | カテゴリ | 発生数 | 同一地点での平均発生回数 | 平均寿命 1 (I) | 平均寿命 2 (II) |
|------|-------------|-----|--------------|---------------|----------------|
| 1) | 上工部 | 333 | 2.0 | 224.4 | 54.6 |
| | コンクリート床版部 | 70 | 2.3 | 159.9 | 51.9 |
| | その他 | 1 | 1.0 | 21.0 | - |
| 2) | 密粒度舗装 (67%) | 355 | 2.2 | 192.4 | 52.6 |
| | 排水性舗装 (26%) | 47 | 1.3 | 374.5 | 77.5 |
| | その他 (7%) | 2 | 2.0 | 17.0 | - |
| 3) | 有 (33%) | 281 | 2.2 | 180.0 | 44.4 |
| | 無 (67%) | 123 | 1.7 | 288.2 | 83.6 |
| 4) | A 地区 (47%) | 121 | 1.7 | 316.4 | 84.6 |
| | B 地区 (53%) | 283 | 2.2 | 168.4 | 43.8 |
| 5) | 上り | 211 | 2.1 | 215.6 | 62.9 |
| | 下り | 181 | 2.0 | 210.0 | 43.3 |
| | センター | 6 | 1.5 | 183.7 | 63.0 |
| | 中央帯 | 6 | 1.0 | 221.8 | - |
| 6) | 直線部 | 288 | 1.8 | 214.6 | 49.9 |
| | 曲線部 | 118 | 2.3 | 208.0 | 66.6 |
| 7) | 輪跡部 | 391 | 2.1 | 206.3 | 53.9 |
| | 非輪跡部 | 13 | 1.1 | 404.5 | 68.5 |
| 8) | 1 回 | 265 | 1.0 | 393.9 | - |
| | 2 回以上 | 139 | 4.4 | 117.7 | 54.3 |
| 合計 | | 404 | 2.0 | 212.7 | 54.0 |

注) 平均寿命 1 は不完全サンプルを含む日数、平均寿命 2 は完全サンプルのみの日数を表す

が得られない。そこで、始めに構造条件と施工条件の全組み合わせに対する相関係数を算出した。構造条件間の相関係数を算出する際には発生地点を 1 サンプル、構造条件と施工条件および施工条件間の相関係数を算出する際には補修回数を 1 サンプルとカウントした。前者は 199 サンプル、後者は 404 サンプルである。相関係数の算出に際して、地域のような定性的パラメータに関しては表-3.11 に示すようなダミー変数として扱った。

表-3.10 は各特性変数の相関関係を示しており、無視できない相関関係が存在することが同表から読み取れる。中には、相関係数が 0.50 以上となる変数のペアが存在している。例えば、4) 管理地域区分では、A 地区と B 地区で補修箇所の平均寿命（不完全サンプル除外）に約 2 倍の相違がみられる。ところが、4) 管理地域区分は 2) 表層の種類と相関が強く（相関係数：-0.577）、さらに 2) 表層の種類は、3) 融雪散水装置の有無とも相関が強い（相関係数：0.604）。相関係数のみで各特性変数の因果関係を明確に説明することはできないが、補修箇所の耐久性に地域的な特徴が関係していると考えられる。4) 管理地域区分の B 地区では密粒度舗装区間の割合が A 地区よりも大きいことから、融雪散水装置の設置割合も高い。結果として、B 地区のポットホール補修箇所の寿命は A 地区よりも短くなると推察される。言い換えれば、ポットホールの発生数や平均寿命は、4) 管理地域区分で異なる

表-3.9 ポットホール発生状況の概要（施工条件）

| 施工条件 | カテゴリ | 発生数 | 平均寿命 1 (I) | 平均寿命 2 (II) |
|------|---------|-----|---------------|----------------|
| 10) | 有 | 90 | 240.0 | 37.5 |
| | 無 | 314 | 204.9 | 60.3 |
| 11) | 有 | 93 | 305.1 | 46.5 |
| | 無 | 311 | 185.1 | 56.5 |
| 12) | 有 | 53 | 132.5 | 10.1 |
| | 無 | 351 | 224.8 | 62.6 |
| 13) | 人力 | 211 | 116.3 | 45.9 |
| | 作業車 | 98 | 342.3 | 88.3 |
| | 機械 | 90 | 306.5 | 41.4 |
| | その他 | 5 | 53.6 | 32.3 |
| 14) | カットバック系 | 76 | 237.6 | 66.3 |
| | 樹脂・改質系 | 328 | 206.9 | 51.1 |
| 全体 | | 404 | 212.7 | 54.0 |

注) 平均寿命 1 は不完全サンプルを含む日数、平均寿命 2 は完全サンプルのみの日数を表す

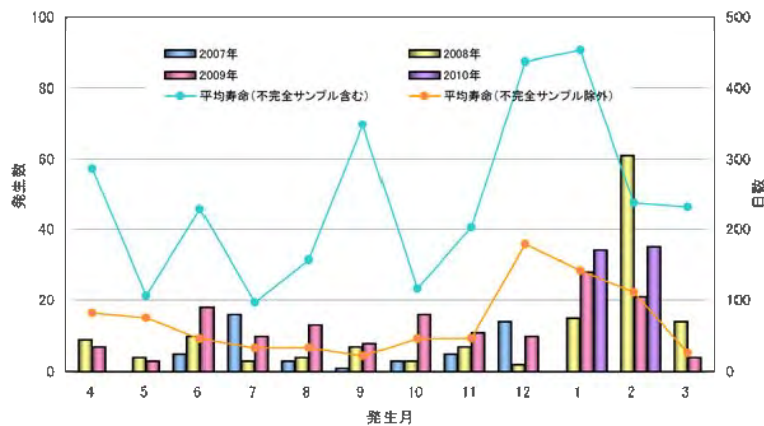


図-3.16 月別のポットホール発生数と平均寿命

が、3) 融雪散水装置の有無、あるいは2) 表層の種類の変数となっている可能性が大きい。また、同様の理由で相関が強い9) 大型車交通量もこれらの代理変数である可能性がある。さらに、4) 管理地域区分と13) 締め固め方法、14) 常温混合物の種類、16) 施工時間との間で相関係数0.5以上の強い相関関係を有している。こうした関係を踏まえて、可能な限り相関性が少なくかつポットホールの発生に直接的に影響を与えるような条件の組み合わせをハザードモデルの特性変数の候補として採用する。これに先立ち、ポットホール生存確率への各特性変数の影響度を評価するため、単一の変数を取りあげてハザードモデルを推計した結果を示す。

表-3.10 各条件間の相関係数（相関係数 0.4 以上）

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|----|---|--------|--------|--------|---|---|---|---|-------|----|----|----|--------|--------|----|----|----|----|
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | - | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | - | 0.604 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | - | -0.577 | -0.409 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | - | - | - | - | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | - | - | - | - | - | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | - | - | - | - | - | - | 1 | | | | | | | | | | | |
| 8 | - | - | - | - | - | - | - | 1 | | | | | | | | | | |
| 9 | - | -0.405 | - | 0.721 | - | - | - | - | 1 | | | | | | | | | |
| 10 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | | | | | | | | |
| 11 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.640 | - | 1 | | | | | | | |
| 12 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | | | | | | |
| 13 | - | - | - | 0.840 | - | - | - | - | 0.698 | - | - | - | 1 | | | | | |
| 14 | - | - | - | 0.667 | - | - | - | - | 0.465 | - | - | - | 0.437 | 1 | | | | |
| 15 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | | | |
| 16 | - | - | - | -0.506 | - | - | - | - | - | - | - | - | -0.430 | -0.422 | - | 1 | | |
| 17 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | |
| 18 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |

ハザードモデルのパラメータ推計（1 変数のみ考慮）

ポットホール点検シートの記録と補修後の経過日数を集計したデータベースを用いて、ワイブル劣化ハザードモデルの未知パラメータを推計する。ポットホール補修箇所の寿命に影響すると考えられる特性変数の候補は、既往の研究成果⁵⁸⁾を踏まえて表-3.11 の定性的パラメータならびに定量的パラメータ 9) 大型車交通量： y_2^9 , 15) 施工時気温： y_2^{15} , 16) 施工時間： y_2^{16} , 17) ポットホールの面積： y_2^{17} , 18) ポットホールの深さ： y_2^{18} とする。なお、定量的パラメータを扱う際には、観測値の最大値が 1 となるように基準化する。

表-3.11 定性的パラメータへのダミー変数割り当て（1 変数）

| 定性的パラメータ | | ダミー変数の値 | |
|---------------|------------|---------|-----------|
| | | 1 | 0 |
| 1) 道路構造物 | y_2^1 | 上工部 | コンクリート床版部 |
| 2) 表層の種類 | y_2^2 | 密粒度舗装 | 排水性舗装 |
| 3) 融雪散水装置 | y_2^3 | 散水装置 有 | 散水装置 無 |
| 4) 管理地域区分 | y_2^4 | A 地区 | B 地区 |
| 5) 車線情報 | y_2^5 | 上り車線 | 下り車線 |
| 6) 道路の平面線形 | y_2^6 | 直線部 | 曲線部 |
| 7) 走行位置区分 | y_2^7 | 輪跡部 | 非輪跡部 |
| 8) 複数回発生 | y_2^8 | 複数回発生 有 | 複数回発生 無 |
| 10) ポットホール内の水 | y_2^{10} | 水の除去 有 | 水の除去 無 |
| 11) ポットホール内の泥 | y_2^{11} | 泥の除去 有 | 泥の除去 無 |
| 12) 融雪散水 | y_2^{12} | 融雪散水 有 | 融雪散水 無 |
| 13) 締め固め方法 | y_2^{13} | 作業中で転圧 | 人力・機械 |
| 14) 常温混合物の種類 | y_2^{14} | カットバック系 | 樹脂・改質系 |

表-3.11 の中で、ポットホール複数回発生 (y_2^0) は、同一地点におけるポットホールの繰り返し発生回数と同義であり、通常は定量的パラメータとして扱うことができる。図-3.17 は同一箇所におけるポットホール発生回数と地点数ならびに平均寿命の関係を示している。計 199 地点のうち、発生回数 1 回が約 140 地点を占める。平均寿命（不完全サンプル含む）は、繰り返し発生回数の増加と共に短くなる傾向があるが、平均寿命（不完全サンプル除外）については、発生回数に対する平均寿命の大きな変動は確認できない。不完全サンプルを除外したときの平均寿命の変動および定性的パラメータとして扱った場合と定量的パラメータとして扱った場合のワイブル劣化ハザードモデルの推計結果から、同一地点におけるポットホールの発生回数そのものよりも、再発するかどうかの耐久性の要因分析を行う上で重要となる可能性が大きい。そのため、同一箇所発生回数から複数回発生の有無と表記を改め、これを定性パラメータとしている。

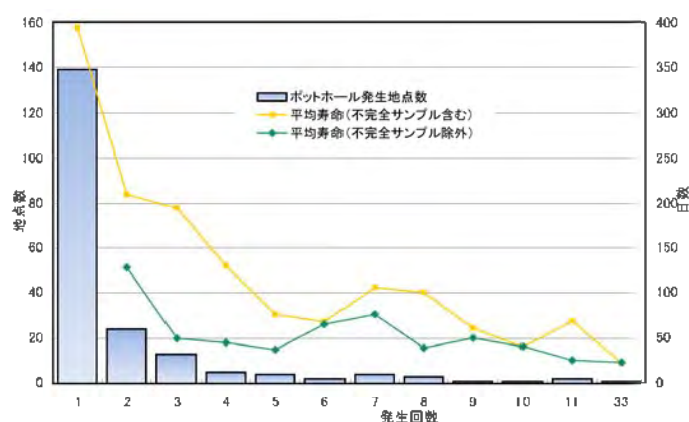


図-3.17 同一箇所におけるポットホール発生回数と地点数、平均寿命の関係

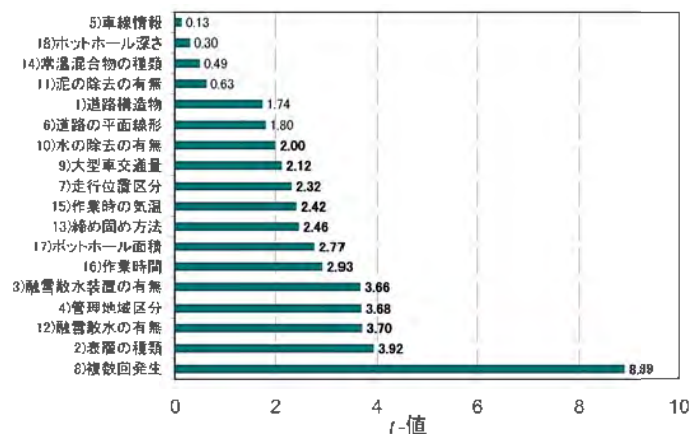


図-3.18 各特性変数の t-値

ここで、ハザード関数を式 (3.10) に基づいて、

$$\gamma^j = \eta_1^j + \eta_2^j y_2^j \quad (j = 1, \dots, 18) \quad (3.19)$$

と表し、1変数のみを考慮したワイブル劣化ハザードモデルを定義する。また、データベースを用いてモデルの推計を18個の特性変数の候補の数だけ行い、個々の特性変数に対応する未知パラメータ η_2^j の t -値が1.96以上（有意水準5%）の候補を1変数ワイブル劣化ハザードモデルの特性変数として採用する。本解析において t -値が1.96以上となった特性変数は12個である。 t -値が大きい上位4つの特性変数に関する当モデルの推計結果を1例として、表-3.12 から表-3.15 に示す。表-3.12 の「ポットホール複数回発生の有無」を特性変数として採用した場合、式 (3.19) より定数項 η_1^8 が負値：-3.55、 η_2^8 が正値：1.37 となることから、ポットホールが複数回発生した箇所（ $y_2^8 = 1$ ）は、複数回発生しない箇所（ $y_2^8 = 0$ ）よりもハザード関数 $h(t)$ のパラメータ γ の値が大きくなる。これは、ポットホールが複数回発生した地点ではポットホールが再発生する（早期に常温混合物が剥脱して補修箇所が寿命に達する）可能性が高いことを意味しており、ポットホールの再発生がランダム事象ではなく、何らかの要因に依存していることを表している。また、表-3.13 から表-3.15 も同様の解釈により、密粒度舗装、融雪散水有り、地域 B、融雪散水装置有り、ポットホール補修箇所が補修後の早期に寿命に達する可能性が高い。これら以外の特性変数の推計結果に関しては割愛するが、図-3.18 で t -値が有意であった特性変数に関して次のような要因で補修箇所の耐久性が低下するという結果を得た：16) 施工時間が長い、17) ポットホールの面積が大きい、13) 人力・機械による締固め、15) 気温が低い、7) わだち部、9) 大型車交通量が少ない、10) ポットホール内の水を除去しない。

次に、各特性変数と補修箇所の耐久性の関係を明確にするため、表-3.12、表-3.13 の最尤推計量を用いて補修箇所の生存確率 $\tilde{F}(t)$ を導出した。図-3.19、図-3.20 は、補修後の経過日数 (t) と生存確率 $\tilde{F}(t)$ の関係を示したものである。形状パラメータ m が1未満であることから、何れのケースも時間の経過と共に生存確率の減少速度は小さくなる。このことは、補修箇所の常温混合物が性能を発揮するまでに早期に破損するケースと性能を発揮して長期間持続するという2つの状況が存在することを示唆している。また、図-3.19 でポットホール複数回発生有りの場合、補修後5日で生存確率が約80%まで低下するのに対し、無しの場合は約100日ほど要する。図-3.20 の表層の種類では、密粒度舗装上に発生したポットホール補修箇所の生存確率が約80%まで低下するのに12日程度であるのに対し、排水性舗装上のポットホールは100日以上経過しても同確率は80%を越えている。

表-3.12 推計結果 1 複数回発生の有無 η_2^8

| | m | η_1^8 | η_2^8 |
|-----------|--------|------------|------------|
| | 形状 | 定数項 | 複数回発生 |
| 最尤推計量 | 0.447 | -3.55 | 1.37 |
| (t -値) | (17.5) | (-18.2) | (8.89) |
| AIC | 2486.0 | | |

表-3.13 推計結果 2 表層の種類 η_2^2

| | m | η_1^2 | η_2^2 |
|-----------|--------|------------|------------|
| | 形状 | 定数項 | 表層材料 |
| 最尤推計量 | 0.416 | -3.68 | 1.17 |
| (t -値) | (17.1) | (-11.4) | (3.92) |
| AIC | 2552.9 | | |

表-3.14 推計結果 3 融雪散水の有無 η_2^{12}

| | m | η_1^{12} | η_2^{12} |
|-----------|--------|---------------|---------------|
| | 形状 | 定数項 | 融雪散水の有無 |
| 最尤推計量 | 0.412 | -2.70 | 0.695 |
| (t -値) | (17.2) | (-18.0) | (3.70) |
| AIC | 2563.1 | | |

表-3.15 推計結果 4 地域 η_2^4

| | m | η_1^4 | η_2^4 |
|-----------|--------|------------|------------|
| | 形状 | 定数項 | 地域 |
| 最尤推計量 | 0.418 | -2.46 | -0.593 |
| (t -値) | (17.1) | (-16.6) | (3.68) |
| AIC | 2560.0 | | |

最適モデルの推計

ここまで、ポットホール補修箇所の耐久性に影響を及ぼすと考えられる 18 個の特性変数の候補から変数を 1 つだけ選定し、ワイブル劣化ハザードモデルを推計した結果、12 の特性変数で統計的な有意性を確認した。特性変数を同時に複数考慮したワイブル劣化ハザードモデルの推計も可能であり、補修箇所の耐久性を総合的に評価する場合、複数の特性変数を考慮した最適なワイブル劣化ハザードモデルを推計する必要がある。ここでは、12 個の特性変数をベースに多変数のモデルを推計するため、次式で定義されている AIC⁵⁴⁾を導入してモデルの適性を評価する。

$$AIC = -2 \ln(L_n) + 2K \quad (3.20)$$

同式から明らかなように、AIC は対数尤度と未知パラメータ数 K によって決定される。未知パラメータの数が多いほど、対象とする事象を詳細に説明できるモデルとなるが、モデルが詳細になればサンプルデータの偶発的な差異もモデル化されてしまい、モデルの汎用性を損ねる。AIC はモデルの精緻さと堅牢性のバランスにより適切なモデルを決定するための指標であり、本研究では AIC が最小のモデルを最適モデルとする。最適モデルの決定フローを図-3.21 に示す。

ここでは、まず 2 変数を考慮したワイブル劣化ハザードモデルについて述べる。一次分析で述べたように、12 の特性変数のうち、2) 表層の種類、4) 管理地域区分に関しては直

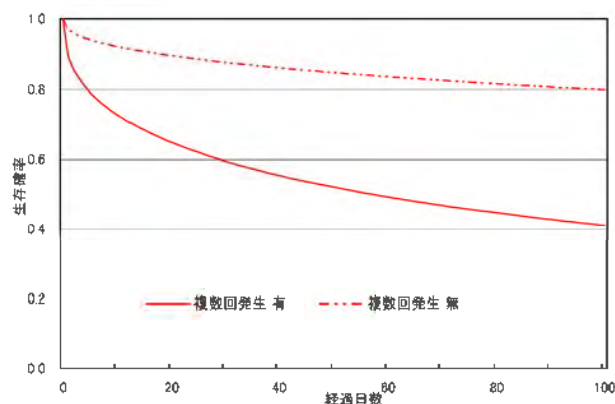


図-3.19 ポットホール補修箇所の耐久性 1

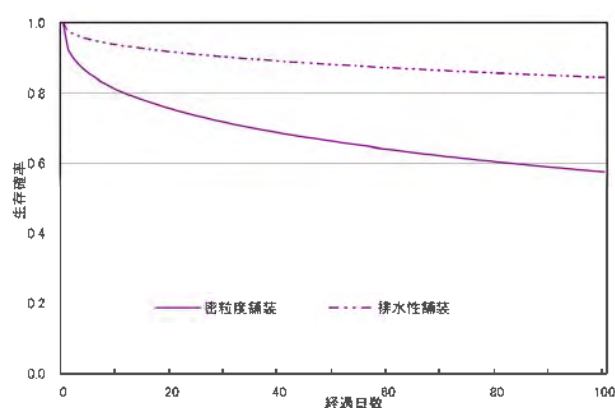


図-3.20 ポットホール補修箇所の耐久性 2

接的に、16) 作業時間、13) 締め固め方法、9) 大型車交通量については4) 管理地域区分を介して間接的に、それぞれ3) 融雪散水装置の有無と相関性が高い。表-3.16に融雪散水装置の有無とポットホール発生件数の関係を表層の種類別に示す。表より、密粒度舗装区間で発生したポットホールの約79% (281/356)で融雪散水装置が設置されているのに対し、排水性舗装区間では0%である。補修箇所の耐久性に水が大きく関与することが従来から指摘されていること、融雪散水装置が密粒度舗装区間に限定して設置されていることから、今回の分析においては表層の種類が融雪散水装置の代理変数となっていると判断する。また、A地区には排水性舗装区間が地区全体の45.5%を占めているのに対し、B地区では排水性舗装区間が存在しないことから、同様に融雪散水装置の代理変数とみなす。以上の理由から、上記5変数を除いた7変数を対象として解析する。

7変数のうち、2変数を取り出した全ケースについてワイブル劣化ハザードモデルを推計した結果、 t -値および符号条件を満足するもののうちAICが最小となったモデルは{複数回発生の有無、融雪散水の有無}であった。また、変数の数を3、4、5としたモデルで t -値

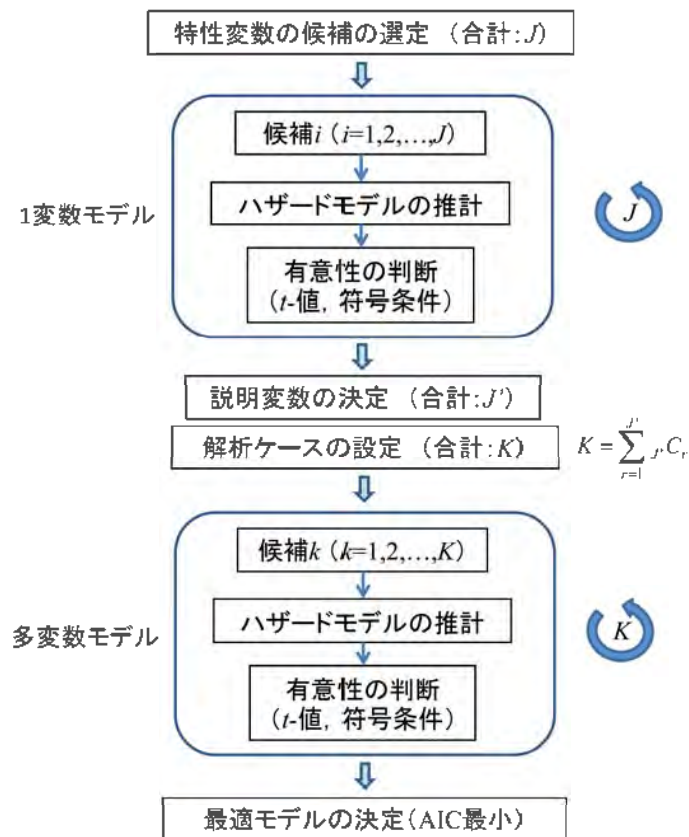


図-3.21 最適モデルの決定手法

表-3.16 融雪散水装置の有無と表層の種類

| | 密粒度舗装区間 | 排水性舗装区間 | 計 |
|----------|---------|---------|-----|
| 融雪散水装置有り | 281 | 0 | 281 |
| 融雪散水装置無し | 75 | 48 | 123 |
| 計 | 356 | 48 | 404 |

と符号条件を満足するワイブル劣化ハザードモデルのうち、AIC が最小となるのは3変数 {複数回発生の有無, 融雪散水の有無, 融雪散水装置の有無} である。推計結果を表-3.17, 表-3.18 に, 補修箇所の経過H数と生存確率の関係を図-3.22, 図-3.23 に示す。図-3.23 より, ポットホールが複数回発生し, かつ融雪散水装置と融雪散水が共に有りに該当する補修箇所では約 10 日ほどで半数が寿命に達するが, ポットホールが初回発生で水の影響が無いような箇所では, 100 H経過しても 9 割以上の補修箇所が生存すると考えられる。

表-3.17 推計結果 5 複数回発生の有無 η_2^8 , 融雪散水の有無 η_3^{12}

| | m | η_1 | η_2^8 | η_3^{12} |
|-----------|--------|----------|------------|---------------|
| | 形状 | 定数項 | 複数回発生 | 融雪散水 |
| 最尤推計量 | 0.455 | -3.70 | 1.40 | 0.790 |
| (t -値) | (17.8) | (-18.4) | (9.04) | (4.19) |
| AIC | 2473.3 | | | |

表-3.18 推計結果 6 複数回発生の有無 η_2^8 , 融雪散水の有無 η_3^{12} , 融雪散水装置の有無 η_4^3

| | m | η_1 | η_2^8 | η_3^{12} | η_4^3 |
|-----------|--------|----------|------------|---------------|------------|
| | 形状 | 定数項 | 複数回発生 | 融雪散水 | 融雪散水装置 |
| 最尤推計量 | 0.457 | -3.93 | 1.36 | 0.693 | 0.363 |
| (t -値) | (17.8) | (-17.1) | (8.76) | (3.60) | (2.19) |
| AIC | 2470.3 | | | | |

3.3.4 実証分析の考察

ハザードモデルによる評価

ハザードモデルの推計結果から、ポットホール補修箇所の耐久性は複数回発生の有無、融雪散水あるいは融雪散水装置の有無が関係している。なお、最適モデルの特性変数として採用した融雪散水の有無と融雪散水装置の有無は、表-3.10において両者の相関は小さいが実質的に同義と考えられる。いずれにしても、補修箇所の耐久性に水の存在が大きく関与していることが統計的に実証された。もう1つの特性変数である複数回発生に関しては、統計上有意とされていない何らかの道路構造的な共通要因が寄与している可能性がある。したがって、ポットホールが繰り返し発生している箇所では、現地調査を実施して原因究明にあたり、かつ、他の補修工法を検討することも必要であろう。なお、本研究のハザードモデルの推計結果は対象地域のみ適用可能であり、積雪地域全域において同様の結果が得られることを保証するものではない。これら一連の手法を用いて各地域で分析を行い、改善すべき点を見出すことが重要なのである。

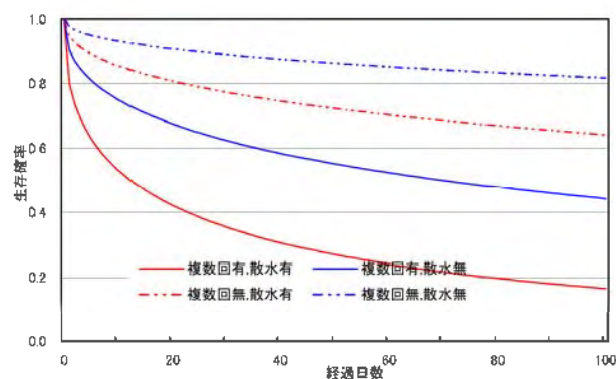


図-3.22 ポットホール補修箇所の耐久性 3

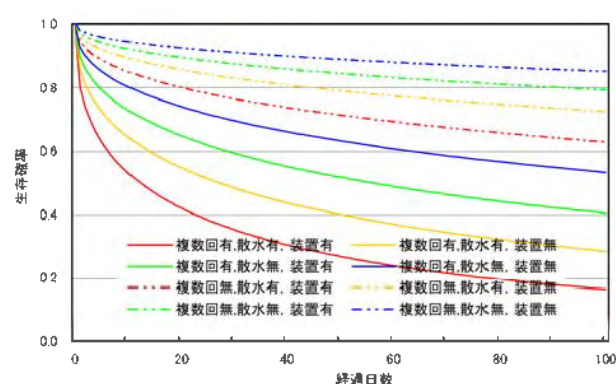


図-3.23 ポットホール補修箇所の耐久性 4

実務的な示唆

ハザードモデルの推計結果から示されたポットホール補修箇所の寿命と特性変数の関係は、道路管理者に新たな知見を提供する（あるいは経験的な知識を再確認）ものであり、これを実務に生かすことが日常点検業務の改善につながる。ここでは、室内試験や実証分析で得た知見を補修箇所の実例を踏まえて整理する。まず第一に、補修作業時には水の影響を極力防ぐ（ポットホール内の水を除去する）ことが重要である。これは従来から指摘されている事項であるが、実証分析を通じてその重要性が統計的に示された。一方、水の除去の対処を施しても、同一地点でポットホールが複数回発生するような場合には、常温混合物を用いた応急的な補修ではなく、長期的な対策を考える必要がある。第二に、常温混合物の保管方法をあげる。室内試験において、低温条件では混合物の締め固め密度が小さくなり、供試体の強度も低下する傾向が見られることから、冬季において常温混合物を点検車両の荷台ではなく、暖房を付けた車内に保管する（以下、保温保管と称する）ことが望

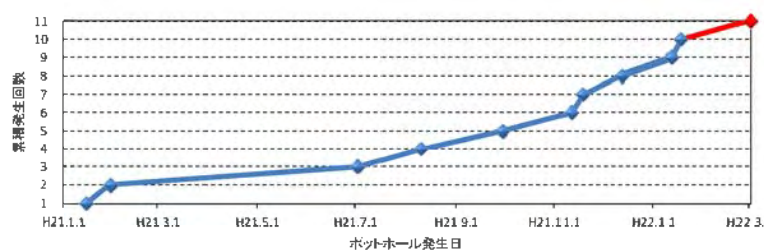


図-3.24 補修履歴 1

表-3.19 補修時の状況（補修履歴 1）

| 発生回数 | 補修時 気温 (°C) | 作業時間 (分) | 融雪散水の有無 | ポットホール 内の水 | ポットホール 内の泥 | 補修時の常温 混合物の状況 |
|------|----------------|-------------|---------|---------------|---------------|------------------|
| 1 | 1 | 20 | 無し | 除去した | 無し | 荷台積み置き |
| 2 | 8 | 20 | 無し | 無し | 無し | 保温保管 |
| 3 | 21 | 20 | 無し | 無し | 除去 | 荷台積み置き |
| 4 | 26 | 20 | 無し | 除去した | 無し | 荷台積み置き |
| 5 | 18 | 20 | 無し | 無し | 無し | 荷台積み置き |
| 6 | 14 | 20 | 無し | 除去した | 無し | 荷台積み置き |
| 7 | 8 | 20 | 無し | 除去した | 無し | 荷台積み置き |
| 8 | 14 | 20 | 無し | 除去した | 無し | 荷台積み置き |
| 9 | 5 | 20 | 無し | 無し | 無し | 荷台積み置き |
| 10 | 2 | 20 | 無し | 無し | 無し | 荷台積み置き |

ましいことが判明した。本結果を踏まえて、実証分析期間の後半に保温保管を試験的に実施しているが、保温保管の有無を特性変数として組み入れるだけのサンプルを同期間内に蓄積するまでには至っていない。そのため、ワイブル劣化ハザードモデルの特性変数として考慮していないが、いくつかの実例を示す。図-3.24 は土工部の密粒度舗装区間、直線部のわだち部で 10 回ポットホールが発生した地点の補修履歴を示している。横軸はカレンダー時刻、縦軸はポットホール累積発生回数を表しており、同図より 2 回目の補修で 5 ヶ月ほど生存していることがわかる。表-3.19 に各補修時点の施工条件を記載しているが、唯一、常温混合物を保温保管したことに起因しているように見受けられる。一方、図-3.25 はコンクリート床版部の密粒度舗装区間、直線部のわだち箇所でも 8 回ポットホールが発生した地点の補修履歴である。同図のように、保温保管しても生存期間が短いケースや保温保管しない場合でも長いケースも存在する。保温の効果を検証するためには今後データを蓄積していく必要があるが、保温保管といっても車内に常温混合物を保管しておく程度であり、実用を試みる価値は十分あると考えられる。

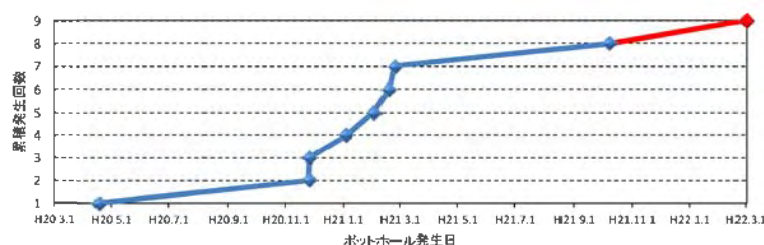


図-3.25 補修履歴 2

表-3.20 補修時の状況（補修履歴 2）

| 発生回数 | 補修時 気温 (℃) | 作業時間 (分) | 融雪散水 の有無 | ポットホール 内の水 | ポットホール 内の泥の有無 | 補修時の常温 混合物の状況 |
|------|---------------|-------------|-------------|---------------|------------------|------------------|
| 1 | 13 | 5 | 無し | 除去しない | 無し | 荷台積み置き |
| 2 | 9 | 7 | 有り | 除去しない | 無し | 荷台積み置き |
| 3 | 8 | 9 | 無し | 除去した | 除去した | 荷台積み置き |
| 4 | 3 | 7 | 無し | 無し | 除去しない | 荷台積み置き |
| 5 | 1.8 | 7 | 無し | 無し | 除去しない | 保温保管 |
| 6 | 0.4 | 10 | 無し | 除去した | 除去しない | 保温保管 |
| 7 | 6 | 8 | 無し | 無し | 除去しない | 保温保管 |
| 8 | 18 | 10 | 無し | 除去しない | 除去しない | 荷台積み置き |

3.4 本章の考察

本章では、緊急補修の大半を占めるポットホールの補修に着目し、同補修に用いる常温混合物の適性を評価するための室内試験を設定し、同時にポットホール点検データを用いて補修箇所の耐久性を評価する方法論を提案して室内試験とポットホール補修箇所の実証分析の結果を示した。室内試験では、常温混合物の適性を「作業性」「耐水性」「耐久性」で表現し、作業性はカットバック系の開粒度タイプの混合物、耐水性は特殊樹脂・改質アスファルト系の密粒度タイプの混合物、耐久性は同開粒度タイプの混合物に適性があること、温度条件、水の存在がこれらに影響することを示した。また、実証分析では、補修作業の状況を詳細に記録する点検シートを作成し、点検記録データにワイブル劣化ハザードモデルを適用して未知パラメータを推計した。その結果、ハザードモデルの形状パラメータ m の値が概ね 0.4 程度であり、補修箇所が寿命に達する確率には時間依存性があり、補修直後の短期間（数日程度）で寿命に達するものや長期間（数十日以上）生存するものがあることが判明した。特に補修箇所の耐久性に影響を及ぼす要因として、ポットホールが

複数回発生するような地点，融雪散水の影響を受ける地点があり，全条件に該当する地点では，補修箇所の約半数が10日以内に寿命に達することが明らかになった．本結果は，室内試験の試験条件（特に水の存在）と同じ傾向を示している．一方，実証分析において常温混合物の種類の t -値は低く，現道の補修箇所の耐久性に混合物の種類が有意に影響していない．これは，現地において水の影響が余りにも大きいこと，あるいは複数回発生している箇所で既設舗装そのものに何らかの原因があることを意味する．

以上の室内試験，実証分析の結果から，今後は実証分析で得た融雪散水の厳しい条件でも性能を発揮する常温混合物（例えば水が硬化触媒として作用する混合物）の開発ならびに同混合物の室内試験による評価が必要である．また，室内試験で得た適性の実証分析で有意でないことから，既設舗装の状態を確認し，同一箇所で繰り返しポットホールが発生する場合，一定回数を越えれば室内試験で示した性能を常温混合物が発揮できないとみなし，補修工法を変更するような日常点検のルールを設定することも求められる．さらに，本研究では検証に至っていないものの，室内試験のもう一つの知見である常温混合物の保温保管の効果を検証することも望まれる．先に述べたとおり，室内試験，実証分析を相互に繰り返し実施することにより，新たな問題点が浮き彫りになり，対策を通じて補修箇所の耐久性向上を図ることが重要である．日常点検における舗装技術の継続的な改善は，このようにして達成されるべきであろう．

第4章 舗装構造の改善に向けた舗装の劣化予測と異質性評価

4.1 総説

1章で述べているとおり、舗装の設計期間は疲労破壊によりひび割れが生じるまでの期間とされる。舗装の構造に関する技術基準・同解説によると、“疲労破壊によりひび割れが発生した後、舗装に多数のひび割れが生じ、安全かつ円滑な交通が確保することが困難となった時に舗装が打ち換えられる。ただし、その時期は道路管理者の判断によっており、基準化されていない”とされている⁵⁾。したがって、疲労破壊がどの程度生じれば打ち換えるかの判断は道路管理者に委ねられる。社団法人日本道路協会から発刊されている舗装の性能評価法では、ひび割れ率20%をアスファルト舗装の疲労破壊と定義している²²⁾。ところが、ひび割れが20%に達した時点で舗装構造全体が破損に至っているかどうかは不明であり、この時点で舗装の打ち換え工法を採用することは現実的とは言えない。事実、表-2.4や表-2.5に基づいて修繕工法を選択する場合、ひび割れ率20%だけでは簡易的な工法や表層の切削オーバーレイ工法が採用されることが考えられる。一方、このように軽微な修繕を繰り返し実施すると、舗装の構造的な耐荷力が低下して路面の劣化速度が相対的に早くなり、修繕後の耐用年数は次第に短くなる。繰り返し修繕回数と耐用年数の関係を分析した研究^{41) 59)}において、このことが実証的に示されている。

舗装の耐用年数の低下はLCCの増大につながることから、舗装構造の劣化の程度を把握して適切な工法で修繕を行い、路面と舗装の寿命が同設計期間を上回るように管理することが道路管理者に求められる。そのためには、路面の状態はもとより舗装構造の耐荷力を評価することが不可欠である。ところが、耐荷力を評価するために行う構造調査は交通規制を伴うため、調査対象区間が広範囲に及ぶ場合あるいは調査間隔を短く設定した場合、長時間の交通規制により渋滞が生じ、社会費用が増大する。さらに、舗装構造調査の単位延長あたりの調査コストは、路面性状調査と比較して一般的に高い。そのため、修繕対象の全区間で構造調査を実施することは現実的ではなく、耐荷力の低下が生じている可能性が高い区間を抽出し、その区間で効率的に構造調査を実施することが望ましい。本章では、こうした区間を抽出し、効率的に構造調査を実施するための方法論を提案する。そこで、道

路管理者が観察できない要因による舗装の劣化の早さを劣化速度の異質性と称し、異質性の高い区間では平均的な区間と比較して路面のパフォーマンスが早期に低下すると仮定する。つまり平均的なパフォーマンスカーブと比較して、異質性の高い道路区間では舗装の耐荷力の低下（構造的な劣化）を含む何らかの劣化要因が存在するため、相対的に劣化速度が早いとみなす。以上の仮定のもと、パフォーマンスカーブの特性変数の未知パラメータと異質性パラメータを推計し、舗装の構造的な劣化が疑われる区間を抽出する。また、実証分析として異質性の高い箇所で行き交わみ調査を実施し、過去の修繕履歴を踏まえて劣化が相対的に早く進行している原因を分析する。

4.2 基本的な考え方

4.2.1 従来の研究との関係

3章のワイブル劣化ハザードモデルを用いたポットホール補修箇所の耐久性分析では、補修箇所の状態を「健全」か「寿命に達しているか」の2値で表し、補修後の経過日数と寿命に達する確率の関係から補修箇所の耐久性を評価した。一方、舗装路面のパフォーマンスの変化を推定する手法として、パフォーマンスの高さを離散的な健全度ランクで表現し、健全度の変化を段階的に推定する多段階の劣化ハザードモデルが提案されている。その中で、マルコフ推移確率モデルはインフラの健全度の時間的な変化を推移確率を用いて表現できることから、これらの統計的な劣化モデルとして多くの研究で活用されている。例えば、Michalani and Madanat⁶⁰⁾は、2つの隣接する健全度のみを対象として、マルコフ推移確率を指数ハザードモデルを用いて表現する方法を提案した。一方、津田ら⁶¹⁾は、2つ以上の任意の健全度間における推移状態を表現する多段階指数ハザードモデルを提案し、マルコフ推移確率を体系的に推計する方法を提案している。その後、マルコフ劣化ハザードモデルに関するさまざまな拡張が試みられ、過去の記憶を有する非斉次マルコフ推移確率を推計するための多段階ワイブル劣化ハザードモデル⁶²⁾、異なる劣化パターン間の推移過程を表現する階層型指数劣化ハザードモデル⁶³⁾、複数のタイプの劣化過程が互いに競合するような競合型劣化ハザードモデル⁶⁴⁾、健全度の観測結果に観測誤差が存在するような隠れマルコフ劣化ハザードモデル⁶⁵⁾が提案されている。これらのハザードモデルは、いずれも特性変数で表現される確定的なハザード関数を用いており、ハザード率の異質性が考慮されていない。小濱ら⁶⁶⁾はハザード率の異質性に着目した混合マルコフ劣化ハザードモ

デルを提案し、橋梁の平均的なパフォーマンスカーブを推計し、さらに異質性パラメータを用いて橋梁個別の劣化速度の相対評価を行っている。また、青木ら⁴⁴⁾は、同モデルを用いた舗装路面の平均的なパフォーマンスカーブによるベンチマーキング解析を試みている。

本研究では、同一グループに分類された道路区間の劣化速度の異質性を相対評価することにより、舗装構造の劣化が疑われる重点管理区間を抽出し、効率的に舗装の構造調査を実施するという実用的な方法論を提案する。

4.2.2 構造調査の効率化の必要性

道路管理者は、路面性状調査や目視観察により路面の劣化状態を観察することはできても、基層以下の各層の劣化状況をこれらの調査結果から観察することはできない。基層以下の劣化状態を観察するためには、開削調査により各層の支持力を直接測定するか、FWDやベンケルマンビーム等を用いてたわみ量を測定する必要がある。開削調査と比較して、FWDやベンケルマンビームを用いた非破壊試験は、開削・復旧の作業が不要なため短時間で調査が可能であるが、路上で停止した状態で調査するために交通規制を必要とする。その結果、規制に起因する道路渋滞が発生して道路利用者の社会損失が発生する。さらに調査が広範囲となれば大きな社会損失が生じ、同時に調査費用も増大する。舗装の維持管理の効率化という観点から、修繕対象区間全体で構造調査を実施することは現実的ではない。海外においては、路上を走行しながらたわみ量を測定する装置も開発されており、FWDのたわみ量との相関が得られているものも存在する⁶⁷⁾。こうした装置をうまく活用すれば社会費用の発生を抑制できると考えられるが、現在実用化されている装置は、装備の大きさや測定値の走行速度依存性が指摘されており、我が国の構造調査に適用するためには解決すべき課題が多い。こうしたことから、修繕が必要な区間の中で構造的な劣化が疑われる区間を抽出して効率的に構造調査を実施し、適切な修繕工法を選択して修繕後の路面の早期劣化を抑えることが調査費用の縮減と社会費用の抑制さらには舗装の耐久性向上による維持管理費の縮減につながると考える。

4.2.3 ベンチマーキングと異質性

路面の状況を継続的に観測してパフォーマンスカーブを推計し、これを比較する方法でも舗装構造の劣化を推定することは可能である。ところが、路面の劣化過程には多くの不

確実性が存在するため、単に劣化速度の違いだけで構造的な劣化の有無を確定的に判定することは困難である。軽微な修繕が繰り返し実施されている供用年数の長い路面では修繕後に路面の劣化が急速に進むと考えられることから、舗設後の経過年数、修繕回数、修繕工法を特性変数としてパフォーマンスカーブを推計するとも可能である。ところが、修繕に際しては路面の損傷状況に応じて修繕工法が選択されるため、非常に多くの修繕工法の選択パターンが存在する。これらの要素をパラメータとしてパフォーマンスカーブを推計する場合、膨大なデータが必要となることは言うまでもない。

そこで、本研究では過去の修繕履歴を考慮しない平均的なパフォーマンスカーブ（基準パフォーマンスカーブ）をベンチマークとして作成し、これを基準として個々の道路区間の劣化速度を相対的に評価して異質性パラメータ ε を推計する。具体的には、舗装の種類、交通・環境条件等に着目して、道路区間を幾つかのグループに分類する。路面の劣化速度は、舗装構造や交通条件が同一であっても基層以下の劣化状態や修繕時の施工条件、舗装材料等に依存することから、こうした劣化速度の異質性を確率変数で表現した混合マルコフ劣化ハザードモデルを定式化する。同モデルを用いることにより、基準パフォーマンスカーブを設定し、個別要素の劣化速度の異質性の相対評価を行い、構造的な劣化が疑われる区間を抽出する。路面の劣化速度の異質性が高い区間を事前に抽出することができれば、（つまり舗装の構造的な劣化が疑われる箇所を抽出することが可能になれば）構造調査の効率化につながると考えられる。

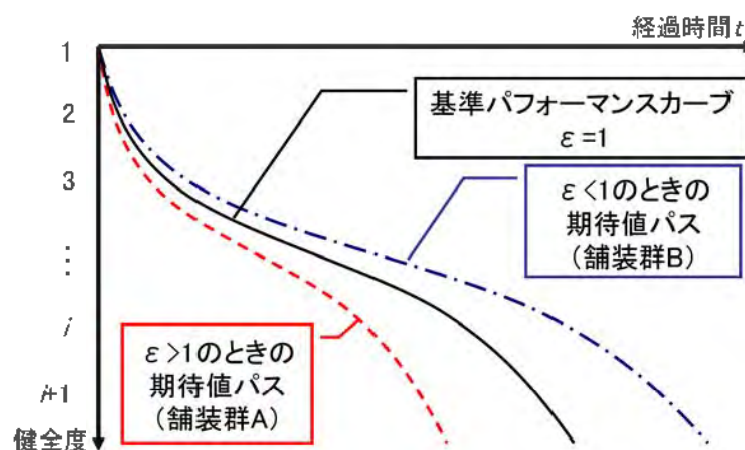


図-4.1 パフォーマンスカーブの相対評価

ここで、対象とする路線全体を K 個のグループに分類し、グループ毎の劣化速度を相対評価する問題を考える。各グループ内の舗装区間は、すべて同一の構造、環境条件を有し

ていると仮定する。図-4.1の実線で描かれたパフォーマンスカーブは、グループ区間全体の平均的なパフォーマンスカーブを表している。この平均的なパフォーマンスカーブより下方に位置する舗装グループ ($\varepsilon > 1$ のグループ) は、劣化速度が相対的に大きく、上方に位置するグループ ($\varepsilon < 1$ のグループ) は小さいと判断できる。平均的なパフォーマンスカーブは路面の劣化速度の大小関係を評価する基準であり、ここでは基準パフォーマンスカーブと呼ぶ。なお、基準パフォーマンスカーブの異質性パラメータ ε の値は1である。同図の舗装群 A は、パフォーマンスカーブが基準パフォーマンスカーブより下方に位置しており、このような舗装群では、早期劣化の原因を究明する必要がある。一方、舗装群 B のパフォーマンスカーブは基準パフォーマンスカーブより上方に位置していることから、何らかの要因で舗装の長寿命化に寄与していると考えられる。

以上、同一の舗装構造を有する舗装群を対象とした劣化速度の相対評価問題を取りあげてきた。異質性パラメータを導入した混合マルコフ劣化ハザードモデルを適用すれば、舗装構造、仕様、使用環境を特性変数で表現することにより、異なる舗装群においても劣化速度の相対評価が可能である。

4.3 劣化速度の異質性を考慮した舗装劣化モデル

4.3.1 モデル化の前提条件

ある時刻を初期時点とする離散的な時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考え、同時間軸上の点を時点と呼び、初期時点と区別する。また、離散的な時間軸の単位時間幅を1とする。さらに路面の状態を I 個の健全度 $i (i = 1, \dots, I)$ で表し、 i の値が大きければ健全度が低下して劣化が進行しているとみなす。路面の劣化がマルコフ過程に従うものとし、離散時間軸上の単位時間間隔における健全度間の推移確率をマルコフ推移確率を用いて表現する。推移確率は、時点 t における健全度 i を与件とし、次の時点 $t+1$ において健全度 $j (j \geq i)$ が生起する条件付確率を π_{ij} と定義する。このような推移確率をすべての健全度ペア (i, j) に対して定義することにより、マルコフ推移確率行列

$$\pi = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \cdots & \pi_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{II} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

を定義することができる。マルコフ推移確率 π_{ij} は所与の 2 つの時点 $t, t+1$ の間において生じる健全度間の推移確率を示したものである。路面の補修が行われな限り常に劣化が進行するため、 $\pi_{ij} = 0$ ($i > j$) が成立する。また、推移確率の定義より $\sum_{j=1}^I \pi_{ij} = 1$ である。したがって、マルコフ推移確率に関して、

$$\left. \begin{aligned} \pi_{ij} &\geq 0 \quad (i, j = 1, \dots, I) \\ \pi_{ij} &= 0 \quad (i > j \text{ の時}) \\ \sum_{j=i}^I \pi_{ij} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

が成立する。状態 I は、修繕が実施されない限りマルコフ連鎖における吸収状態となり、 $\pi_{II} = 1$ が成立する。マルコフ推移確率モデルでは、健全度が $i-1$ から i に推移した時点にかかわらず、時点 t から時点 $t+1$ の間に推移する確率は時点 t における健全度のみに依存するという性質（マルコフ性）を有する。したがって、マルコフ推移確率を用いれば、前回の観測時点 t から、 z 期経過した時点 $t+z$ に至る期間の間に生起する劣化過程を推移確率行列

$$\pi(z) = \{\pi\}^z \quad (4.3)$$

を用いて表現することもできる。また、 z 期推移確率行列 $\pi(z)$ の各要素は $\pi_{ij}(z)$ ($i, j = 1, \dots, I$) である。

4.3.2 混合マルコフ劣化ハザードモデル

マルコフ推移確率の特性変数パラメータならびに異質性パラメータは、小濱らが提案した混合マルコフ劣化ハザードモデル⁶⁶⁾を用いて推計する。ここで、対象路線全体を単位区間で分割したときに L 個の区間が得られるケースを考える。この場合、路線延長は単位区間長 $\times L$ となる。これら L 個のデータの組を舗装構造、舗装の種別、環境条件に基づいて、同質的な道路区間で構成される K 個のグループ k ($k = 1, \dots, K$) に分類する。グループ k ($k = 1, \dots, K$) には合計 L^k 個の単位区間が存在し、グループ k に含まれる任意の単位区間を l^k ($l^k = 1, \dots, L^k$) と表記する。このとき、 L 個の単位区間は、 K 個のグループの内、いずれか 1 つのグループに必ず含まれる。

いま、グループ k の固有な劣化速度の異質性を異質性パラメータ ε^k で表現する。このとき、グループ k に含まれる単位区間 l^k の健全度 i ($i = 1, \dots, I-1$) のハザード率を小濱ら

の式を用いて,

$$\lambda_i^{lk} = \varepsilon^k \tilde{\lambda}_i^{lk} \quad (4.4)$$

$$(i = 1, \dots, I-1; k = 1, \dots, K; l^k = 1, \dots, L^k)$$

と表す。 $\tilde{\lambda}_i^{lk}$ はグループ k の単位区間 l^k が有する健全度 i の平均的なハザード率（以下、基準ハザード率と呼ぶ）である。異質性パラメータ ε^k は、グループ k の基準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{lk}$ からの乖離の程度を表す確率変数であり、 $\varepsilon^k \geq 0$ が成立すると仮定する。異質性パラメータ ε^k の値が 1 を超えて大きくなれば、グループ k に含まれる区間全体の劣化速度が基準ハザード率に対して大きくなる。なお、式 (4.4) において、全てのハザード率に同一の確率変数 ε^k が含まれることに留意する。いま、異質性パラメータ ε^k が、ある確率分布から抽出された確率標本であると考え、グループ k の異質性パラメータ ε^k の値を $\bar{\varepsilon}^k$ に固定する。このとき、単位区間 l^k の調査時点 τ_A^{lk} において健全度が i と判定され、次の調査時点 $\tau_B^{lk} = \tau_A^{lk} + z^{lk}$ においても健全度 i と判定される確率 $\pi_{ii}^{lk}(z^{lk} : \bar{\varepsilon}^k)$ は、指数ハザード関数を用いて、

$$\pi_{ii}^{lk}(z^{lk} : \bar{\varepsilon}^k) = \exp(-\tilde{\lambda}_i^{lk} \bar{\varepsilon}^k z^{lk}) \quad (4.5)$$

と表すことができる。また、調査時点 τ_A^{lk} と τ_B^{lk} の間で健全度が i から $j (> i)$ に推移する確率 $\pi_{ij}^{lk}(z^{lk} : \bar{\varepsilon}^k)$ は、

$$\begin{aligned} \pi_{ij}^{lk}(z^{lk} : \bar{\varepsilon}^k) &= \sum_{s=i}^j \prod_{v=i, \neq s}^{j-1} \frac{\tilde{\lambda}_v^{lk}}{\tilde{\lambda}_v^{lk} - \tilde{\lambda}_s^{lk}} \exp(-\tilde{\lambda}_s^{lk} \bar{\varepsilon}^k z^{lk}) \\ &= \sum_{s=i}^j \psi_{ij}^s(\tilde{\lambda}^{lk}) \exp(-\tilde{\lambda}_s^{lk} \bar{\varepsilon}^k z^{lk}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$(i = 1, \dots, I-1; j = i+1, \dots, I; k = 1, \dots, K; l^k = 1, \dots, L^k)$$

である。ただし、 $\tilde{\lambda}^{lk} = (\tilde{\lambda}_1^{lk}, \dots, \tilde{\lambda}_{I-1}^{lk})$ である。また、 $\psi_{ij}^s(\tilde{\lambda}^{lk})$ は、

$$\psi_{ij}^s(\tilde{\lambda}^{lk}) = \prod_{v=i, \neq s}^{j-1} \frac{\tilde{\lambda}_v^{lk}}{\tilde{\lambda}_v^{lk} - \tilde{\lambda}_s^{lk}} \quad (4.7)$$

となり、ハザード率の関数のみで表される。 $\pi_{iI}^{lk}(z^{lk} : \bar{\varepsilon}^k)$ については、マルコフ推移確率の条件より、

$$\pi_{iI}^{lk}(z^{lk} : \bar{\varepsilon}^k) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi_{ij}^{lk}(z^{lk} : \bar{\varepsilon}^k) \quad (4.8)$$

となる。

次に、ハザード率の期待値が基準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i$ に一致するように異質性パラメータ ε^k が分布すると考え、 ε^k が平均 1、分散 ϕ^{-1} のガンマ分布

$$f(\varepsilon : \phi, \phi^{-1}) = \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} \varepsilon^{\phi-1} \exp(-\phi\varepsilon) \quad (4.9)$$

に従うと仮定する。なお、記述の簡便化のため本節では上付き添え字 k , l^k を省略する。(4.5) の異質性パラメータ ε^k は $[0, \infty)$ の範囲を取り得ることから、(4.5) と (4.9) の同時分布を ε について周辺化した $\tilde{\pi}_{ii}(z)$ を

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_{ii}(z) &= \int_0^\infty \pi_{ii}(z : \varepsilon) f(\varepsilon : \phi, \phi^{-1}) d\varepsilon \\ &= \int_0^\infty \exp(-\tilde{\lambda}_i \varepsilon z) \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} \varepsilon^{\phi-1} \exp(-\phi\varepsilon) d\varepsilon \\ &= \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} \int_0^\infty \exp\left\{(-\tilde{\lambda}_i z - \phi)\varepsilon\right\} \varepsilon^{\phi-1} d\varepsilon \\ &\quad (i = 1, \dots, I-1) \end{aligned} \quad (4.10)$$

と表し、 $u_i = (\tilde{\lambda}_i z + \phi)\varepsilon$ と変数変換すると、

$$du_i = (\tilde{\lambda}_i z + \phi) d\varepsilon$$

より、

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_{ii}(z) &= \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} \int_0^\infty \exp(-u_i) \left(\frac{u_i}{\tilde{\lambda}_i z + \phi}\right)^{\phi-1} \left(\frac{1}{\tilde{\lambda}_i z + \phi}\right) du_i \\ &= \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} \left(\frac{1}{\tilde{\lambda}_i z + \phi}\right)^\phi \int_0^\infty \exp(-u_i) u_i^{\phi-1} du_i \\ &= \frac{1}{\Gamma(\phi)} \left(\frac{\phi}{\tilde{\lambda}_i z + \phi}\right)^\phi \Gamma(\phi) \\ &= \frac{\phi^\phi}{(\tilde{\lambda}_i z + \phi)^\phi} \end{aligned} \quad (4.11)$$

を得る。マルコフ推移確率 $\tilde{\pi}_{ii}(z)$ は、ハザード率の確率分布を考慮した調査間隔 z の平均的なマルコフ推移確率（以下、基準マルコフ推移確率と呼ぶ）を表している。さらに、調査間隔 z のもとで健全度 i から健全度 j へ推移する基準マルコフ推移確率は、(4.6) より、

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_{ij}(z) &= \int_0^\infty \pi_{ij}(z : \varepsilon) f(\varepsilon : \phi, \phi^{-1}) d\varepsilon \\ &= \sum_{s=i}^j \frac{\psi_{ij}^s(\tilde{\lambda}) \phi^\phi}{(\tilde{\lambda}_s z + \phi)^\phi} \end{aligned} \quad (4.12)$$

と表すことができる。

4.3.3 混合マルコフ劣化ハザードモデルの推計

混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて路面の健全度の推移確率を推計するためには、2つの異なる時点の健全度データが必要であるが、健全度データと同時に修繕後の経過時間の情報が得られれば、修繕直後の健全度を最高値とみなすことで2つの時点の健全度データを獲得できる。いま、グループ k ($k = 1, \dots, K$) の単位区間 l^k ($l^k = 1, \dots, L^k$) について、初回の健全度データが得られた時点を $\tau_A^{l^k}$ と表す。次に、時間 \bar{z}^{l^k} が経過した時点 $\tau_B^{l^k} = \tau_A^{l^k} + \bar{z}^{l^k}$ に、2回目の健全度の情報を得たとする。(記号「 $\bar{\cdot}$ 」は健全度の実測値であることを表す) $\sum_{k=1}^K L^k = L$ 個の調査サンプルには初回から2回目の健全度データを得るまでの期間長 \bar{z}^{l^k} と2回の健全度データ i, j の情報が存在する。ここで、2回の健全度データが存在するかどうかを表すダミー変数 $\bar{\delta}_{ij}^{l^k}$ ($i = 1, \dots, I-1; j = i, \dots, I; l^k = 1, \dots, L^k; k = 1, \dots, K$) を

$$\bar{\delta}_{ij}^{l^k} = \begin{cases} 1 & \text{1回目の健全度データ} = i, 2回目の健全度データ = j \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (4.13)$$

と定義する。さらに、ダミー変数ベクトルを $\bar{\delta}^{l^k} = (\bar{\delta}_{11}^{l^k}, \dots, \bar{\delta}_{I-1,I}^{l^k})$ 、路面の劣化に影響を及ぼす舗装特性や環境条件を表す特性ベクトルを $\bar{x}^{l^k} = (\bar{x}_1^{l^k}, \dots, \bar{x}_G^{l^k})$ と表す。ただし、 $\bar{x}_g^{l^k}$ ($g = 1, \dots, G$) はグループ k の単位区間 l^k の調査サンプルに関する g 番目の説明変数の観測値を表す。また、1番目の説明変数は定数項であり、 $\bar{x}_1^{l^k} = 1$ が成立する。路面性状データならびに修繕履歴データから得られるグループ k の l^k の有する路面の情報を $\bar{\xi}^{l^k} = (\bar{\delta}^{l^k}, \bar{z}^{l^k}, \bar{x}^{l^k})$ 、データ全体の情報を Ξ と表す。

次に、調査サンプル l^k の劣化過程をハザード関数 $\lambda_i^{l^k} = \tilde{\lambda}_i^{l^k} \varepsilon^{l^k}$ ($i = 1, \dots, I-1$) を用いて表現する。健全度 I はマルコフ推移確率の吸収状態であり、 $\pi_{II}^{l^k} = 1$ が成立することから、ハザード率 $\tilde{\lambda}_I^{l^k} = 0$ となる。路面の劣化過程を特徴づける基準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{l^k}$ ($i = 1, \dots, I-1; l^k = 1, \dots, L^k$) は道路区間の特性ベクトルに依存すると考え、基準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{l^k}$ を特性ベクトル \bar{x}^{l^k} を用いて、

$$\tilde{\lambda}_i^{l^k} = \exp(\bar{x}^{l^k} \beta_i') \quad (4.14)$$

と表す。ただし、 $\beta_i = (\beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,G})$ は未知パラメータベクトル、記号「 $'$ 」は転置行列を意味する。

平均マルコフ推移確率は、式(4.11)、(4.12)で示しているように基準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{l^k}$ と異質性パラメータの確率分布の分散パラメータ ϕ 、基準ハザード率は、式(4.14)より道路区間の特性ベクトル \bar{x}^{l^k} で表現でき、さらに推移確率は健全度データの観察された間隔 \bar{z}^{l^k} に依

存する。これを表現するために平均マルコフ推移確率 π_{ij}^{lk} を特性変数ならびに観測間隔の実測値データ $(\bar{z}^{lk}, \bar{x}^{lk})$ と未知パラメータ $\theta = (\beta_1, \dots, \beta_{I-1}, \phi)$ の関数として $\pi_{ij}^{lk}(\bar{z}^{lk}, \bar{x}^{lk}; \theta)$ と表す。いま、単位区間で分類された各道路区間の劣化過程が互いに独立であると仮定すれば、全調査データが同時に生起する確率密度を表す尤度関数は、

$$\mathcal{L}(\theta, \Xi) = \prod_{i=1}^{I-1} \prod_{j=i}^I \prod_{k=1}^K \prod_{l^k=1}^{L^k} \left\{ \pi_{ij}^{lk}(\bar{z}^{lk}, \bar{x}^{lk}; \theta) \right\}^{\bar{\delta}_{ij}^{lk}} \quad (4.15)$$

と定式化できる⁵⁶⁾。ただし、 $\theta = (\beta, \phi)$ である。未知パラメータベクトル θ の各要素は、全調査サンプルデータを用いた同時生起確率密度を表す尤度関数 (4.15) の最尤推定量として 3 章に示した方法で同様に導出できる。

4.3.4 異質性パラメータの推計

グループ k の調査サンプル $\bar{\xi}^{lk}$ に着目する。調査サンプル l^k の初回の健全度を $i(l^k)$ ($l^k = 1, \dots, L^k$)、2 回目を $j(l^k)$ とし、さらにパラメータの最尤推定量 $\hat{\theta} = (\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{I-1}, \hat{\phi})$ が所与であるとする。このとき、異質性パラメータが式 (4.9) のガンマ分布 $\bar{f}(\varepsilon; \hat{\phi}, \hat{\phi}^{-1})$ に従い、かつグループ k に属する L^k 個の調査サンプル $\bar{\xi}^{lk}$ が得られた場合、これら L^k 個の調査サンプルが得られる異質性パラメータ ε^k の同時に生起する確率密度関数（部分尤度）は、

$$\begin{aligned} \rho^k(\varepsilon^k; \hat{\theta}, \bar{\xi}^k) &= \left\{ \pi_{i(l^k)j(l^k)}^{lk}(\bar{z}^{lk}, \bar{x}^{lk}; \hat{\theta}, \varepsilon^k) \right\}^{\bar{\delta}_{i(l^k)j(l^k)}^{lk}} \bar{f}(\varepsilon^k, \hat{\phi}, \hat{\phi}^{-1}) \\ &\propto \prod_{l^k=1}^{L^k} \left\{ \sum_{s=i(l^k)}^{j(l^k)} \psi_{i(l^k)j(l^k)}^s(\bar{\lambda}^{lk}(\hat{\theta})) \right. \\ &\quad \left. \exp(-\bar{\lambda}_s^{lk}(\hat{\theta}) \varepsilon^k \bar{z}^{lk}) \right\}^{\bar{\delta}_{i(l^k)j(l^k)}^{lk}} (\varepsilon^k)^{\hat{\phi}-1} \exp(-\hat{\phi} \varepsilon^k) \end{aligned} \quad (4.16)$$

と表すことができる。式 (4.16) の $\bar{\lambda}^{lk}(\hat{\theta}) = (\bar{\lambda}_1^{lk}(\hat{\theta}), \dots, \bar{\lambda}_{I-1}^{lk}(\hat{\theta}))$ であり、基準ハザード率ベクトルである。また、 \propto は比例関係を意味する。ここでは、基準ハザード率 $\bar{\lambda}_i^{lk}$ がパラメータ $\hat{\theta}$ に依存していることを示すため、 $\bar{\lambda}_i^{lk}(\hat{\theta})$ と表している。式 (4.16) の両辺の対数をとることにより、部分対数尤度は、

$$\begin{aligned} \ln \rho^k(\varepsilon^k; \hat{\theta}, \bar{\xi}^k) &\propto \sum_{l^k=1}^{L^k} \bar{\delta}_{i(l^k)j(l^k)}^{lk} \ln \left\{ \sum_{s=i(l^k)}^{j(l^k)} \psi_{i(l^k)j(l^k)}^s(\bar{\lambda}^{lk}(\hat{\theta})) \right. \\ &\quad \left. \exp(-\bar{\lambda}_s^{lk}(\hat{\theta}) \varepsilon^k \bar{z}^{lk}) \right\} + (\hat{\phi} - 1) \ln \varepsilon^k - \hat{\phi} \varepsilon^k \end{aligned} \quad (4.17)$$

となる。したがって、異質性パラメータ ε^k ($k = 1, \dots, K$) の条件付き最尤推計量は、条件付対数尤度最大化問題

$$\max_{\varepsilon^k} \{ \ln \rho^k(\varepsilon^k; \hat{\theta}, \xi^k) \} \quad (4.18)$$

の最適解 $\hat{\varepsilon}^k$ として求めることができる。こうして求めた異質性パラメータの条件付最尤推計量は、パラメータ $\hat{\theta} = (\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{I-1}, \hat{\phi})$ が与えられたときの推定量であり、これを明示するため、(4.18) の最大化問題の解を、 $\hat{\varepsilon}^k(\hat{\theta})$ ($k = 1, \dots, K$) と表す。このとき、各道路区間 l^k ($l^k = 1, \dots, L_k; k = 1, \dots, K$) のハザード率は、式 (4.4) の関係から

$$\hat{\lambda}_i^{l^k}(\hat{\theta}) = \hat{\varepsilon}^k(\hat{\theta}) \tilde{\lambda}_i^{l^k}(\hat{\theta}) \quad (4.19)$$

となる。以降、 $\hat{\lambda}_i^{l^k}(\hat{\theta})$ を個別ハザード率と称す。また、記述の簡便化のために式 (4.19) を

$$\hat{\lambda}_i^{l^k} = \hat{\varepsilon}^k \tilde{\lambda}_i^{l^k} \quad (4.20)$$

と表記する。

4.4 ベンチマーキングと評価

4.4.1 重点管理箇所の抽出と構造診断のプロセス

前節では、舗装のパフォーマンスカーブを混合マルコフ劣化モデルを用いて推計し、さらに標準的なパフォーマンスカーブからの乖離を示す異質性パラメータ ε がガンマ分布に従うと仮定してこれを条件付き対数尤度最大化問題の最適解として求める手法を示した。本節では、推計結果を用いて舗装構造の劣化が疑われる重点管理区間を抽出する手法について述べるが、そのためのプロセスを以下に示す。

ステップ1：基準パフォーマンスカーブの導出 路面性状調査を実施して路面の健全度情報を収集する。収集した健全度データを舗装構造、修繕履歴、使用材料の情報が収録されている舗装台帳データと融合したデータベースを構築する。同データベースに基づいて混合マルコフ劣化ハザードモデルを推計し、平均的な劣化過程を表す基準パフォーマンスカーブを導く。

ステップ2：相対評価と重点管理区間の抽出 劣化速度の相対評価を行うため、対象の道路区間を舗装台帳データに基づいてグルーピングし、各グループの異質性パラメータを

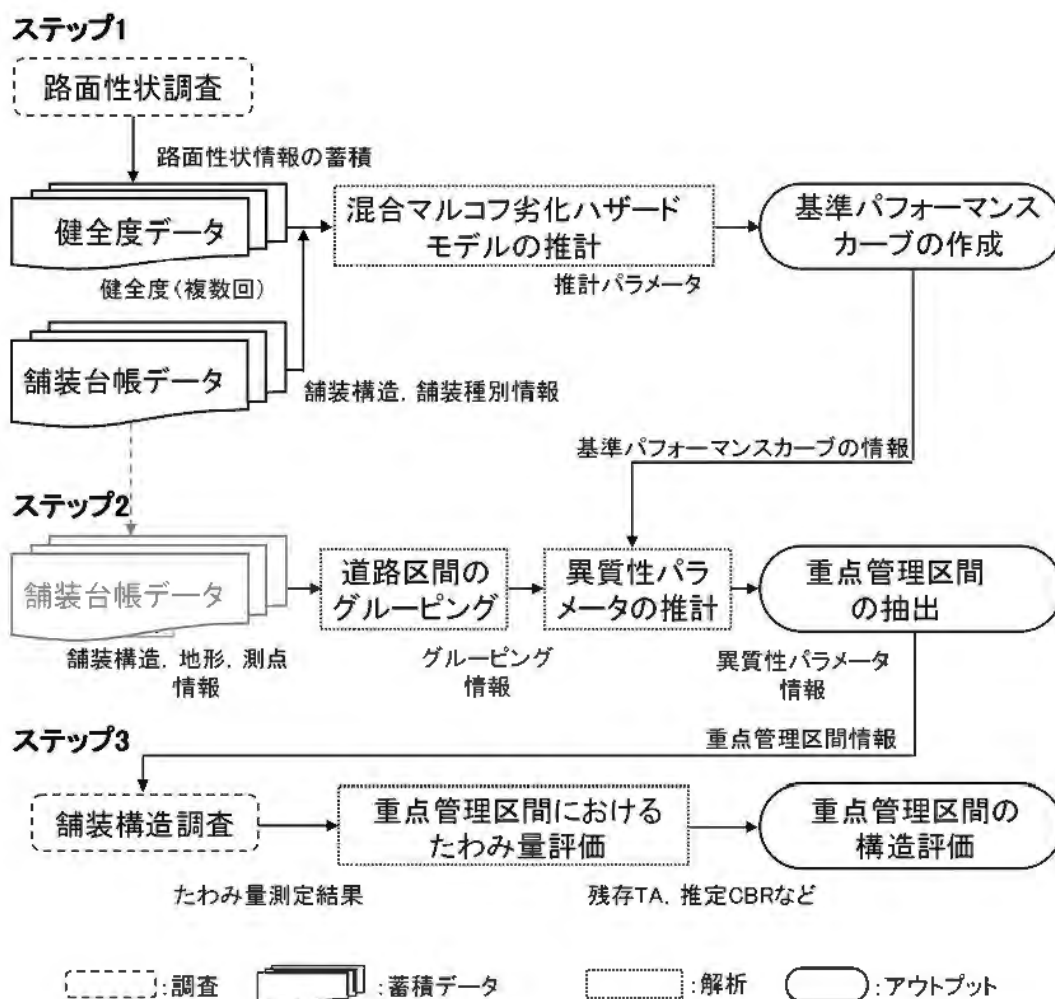


図-4.2 舗装構造診断のプロセス

推計する。異質性パラメータの推計量を用いて劣化速度の大きい上位区間を重点管理区間として抽出する。

ステップ3：たわみ量調査と舗装構造診断 相対的な劣化速度が大きい重点管理区間においてFWDによるたわみ量調査を実施し、構造的な耐荷力と異質性の関係あるいは過去の修繕履歴との関係について考察する。

4.4.2 基準パフォーマンスカーブの導出

一般的に路面の健全度は、ひび割れ率、わだち掘れ、平坦性の3特性値から導出されるMCI等の指標を用いて評価される。これらは、通常、路面性状測定装置を搭載した車両を用いて計測される。同車両は、定常走行しながら自動的に計測するもので、構造調査の

ように交通規制を必要としないため、延長の長い道路でも効率的にデータを収集することができる。いま、データベースを用いて混合マルコフ劣化ハザードモデルを推計し、混合マルコフ劣化ハザードモデルの未知パラメータの最尤推計量 $\hat{\theta}$ を獲得したと仮定する。グループ k に属する道路区間 l^k の特性変数 \mathbf{x}^{l^k} と劣化状態 i のハザード関数のパラメータ最尤推計量 $\hat{\beta}_i$ を用いれば、グループ k の健全度 i ($i = 1, \dots, I-1$) 路面の平均的な劣化速度を表す基準ハザード率は、式 (4.4) から

$$\tilde{\lambda}_i^{l^k} = \exp(\mathbf{x}^{l^k} \hat{\beta}_i') \quad (4.21)$$

であり、混合マルコフ劣化ハザードモデルにおいて異質性パラメータ $\epsilon^k = 1$ に設定したときと一致する。さらに、グループ k における各健全度の寿命 (劣化が進行して次の健全度ランクに移行するまでの所要時間) $ET_i^{l^k}$ は、

$$\begin{aligned} ET_i^{l^k} &= \int_0^\infty \tilde{F}_i(\zeta_i^{l^k}) d\zeta_i^{l^k} \\ &= \int_0^\infty \exp(-\tilde{\lambda}_i^{l^k} \zeta_i^{l^k}) d\zeta_i^{l^k} \\ &= \frac{1}{\tilde{\lambda}_i^{l^k}} \end{aligned} \quad (4.22)$$

と表される。また、修繕が実施されてから健全度 i ($i = 2, \dots, I$) に移行するまでの平均的所要時間 $E[T](i)$ は、

$$E[T](i) = \sum_{j=1}^i \frac{1}{\tilde{\lambda}_j^{l^k}} \quad (4.23)$$

である。式 (4.23) より、縦軸に i 、横軸に $E[T](i)$ をプロットして結んだ曲線は、グループ k の基準パフォーマンスカーブを表す。

4.4.3 相対評価と重点管理区間の抽出

各グループの異質性パラメータの推計量 $\epsilon^k(\hat{\theta})$ に基づいて、劣化の進行が早いグループの集合を明確にするため、全グループの中で劣化速度の大きいグループの上位 $\alpha \times 100\%$ の中に入るようなグループの集合 $\bar{\Omega}_\alpha$ (重点管理集合 $\bar{\Omega}_\alpha$ と呼ぶ) を

$$\bar{\Omega}_\alpha = \{k \in (1, \dots, K) | \epsilon^k(\hat{\theta}) \geq \bar{\epsilon}_\alpha\} \quad (4.24)$$

と定義する．ここに， $\bar{\varepsilon}_\alpha$ は信頼度 $(1 - \alpha) \times 100\%$ とした場合の異質性パラメータの上限値（以降，臨界異質性パラメータ値と称す）であり，

$$\bar{\varepsilon}_\alpha = \min_c \left\{ c \left| \int_c^\infty \bar{f}(\varepsilon : \hat{\phi}, \hat{\phi}^{-1}) d\varepsilon \leq \alpha \right. \right\} \quad (4.25)$$

と定義する．異質性パラメータの推計量が信頼度 $(1 - \alpha) \times 100\%$ の重点管理集合 $\bar{\Omega}_\alpha$ に属する場合，当該グループに属する道路区間は同信頼度で，劣化の進行が速いと判断できる．さらに，個別ハザード率 $\hat{\lambda}_i^k = \hat{\lambda}_i^k \varepsilon^k$ 自体を管理するため，個別ハザード率の推計量 $\hat{\lambda}_i^k$ を大きい順番に $\hat{\lambda}_i^{l(1)}, \dots, \hat{\lambda}_i^{l(n)}, \dots, \hat{\lambda}_i^{l(L)}$ と並べ直す．ただし，上付き添字 $l(n)$ は，すべてのグループに属する道路区間の中で個別ハザード率の推計量 $\hat{\lambda}_i^k$ が n 番目に大きい道路区間の添え字 l^k を表しており， $\hat{\lambda}_i^{l(1)}$ は，もっとも劣化速度が大きい道路区間の混合ハザード率と対応する．また， $L = \sum_{k=1}^K L^k$ はサンプル総数である．このような定義のもとで，劣化速度の大きい道路区間の上位 $\alpha \times 100\%$ の中に入るような道路区間の集合 $\tilde{\Omega}_\alpha$ （重点管理集合 $\tilde{\Omega}_\alpha$ と呼ぶ）を

$$\begin{aligned} \tilde{\Omega}_\alpha &= \{l(1), \dots, l(n^*(\alpha))\} \\ n^*(\alpha) &= \arg \sup_n \left\{ \frac{n}{L} \leq \alpha \right\} \end{aligned} \quad (4.26)$$

と定義する．ただし， n は自然数である．さらに， $\hat{\lambda}_i - \varepsilon^k$ 空間上で重点管理集合 $\tilde{\Omega}_\alpha$ の境界を表す曲線

$$\tilde{\lambda}_i \varepsilon^k = \hat{\lambda}_i^{l(n^*(\alpha))} \quad (4.27)$$

を臨界基準曲線と呼ぶ．

以上の相対評価モデルを用いて路面の劣化速度を評価した結果，グループの劣化速度が重点管理集合 $\bar{\Omega}_\alpha$ ，あるいは $\tilde{\Omega}_\alpha$ に属することが判明した場合，そのグループに属する単位区間は構造的な損傷等何らかの理由で劣化速度が大きい区間と判定される．言い換えれば判定結果から重点管理区間を抽出することが可能となる．

4.4.4 たわみ量調査による舗装構造診断

FWD は，図-4.3 のように舗装に動的な衝撃荷重を作用させたときの応答たわみを計測し，そのたわみの値から舗装の構造を評価する装置である²¹⁾．たわみ量が大きな路面では，交通荷重を受けて疲労破壊が早期に生じる．図-2.1 は，ひび割れ率が20%に達するまでの

累積輪数（49kN 換算輪数）と載荷直下のたわみ量（D0）の関係を示しており、例えば新設舗装のたわみ量が $300\mu m$ の場合、約 500 万輪の繰返し荷重で上記のひび割れが生じるとされる。一方、車道及び側帯の舗装の構造の基準に関する省令において、舗装の疲労破壊輪数は交通量区分に応じて表-4.1 のように設定されている。したがって、ひび割れ率 20%の路面を疲労破壊した状態とみなした場合、たわみ量が $300\mu m$ 以上の舗装は N_6 の交通量区分に該当する道路区間では支持力不足と判定される。たわみ量と交通量区分の疲労破壊輪数の関係から、各交通区分のたわみ量の基準値も提案されている⁶⁸⁾。また、松井ら⁶⁹⁾は、載荷点から離れた箇所のたわみ量の分布から舗装各層の弾性係数を推定する手法を開発している。多層弾性理論による舗装の構造解析⁷⁰⁾では、舗装の厚さ、弾性係数、ポアソン比を所与として、交通荷重で生じる歪み変形を多層弾性モデルで推定する。松井らが提案した手法は、弾性係数の初期値を設定し、同モデルから算出されるたわみ量の理論値と実際のたわみ量の関係から両者の差が小さくなるように弾性係数をガウス・ニュートン法を用いて最適化している。その他、弾性係数を最適化する手法が幾つか提案されている⁷¹⁾。また、FWD によるたわみ量の実測値から弾性係数を直接推定し、舗装の構造評価を行う手法も提案されている^{72) 73)}。

このように、たわみ量は舗装の耐荷力の情報を道路管理者に提供するものであり、修繕工法の選択にも有用である。また、そのためのシステム開発も行われている⁷⁴⁾。

表-4.1 疲労破壊輪数の基準値⁴⁾

| 交通量区分 | | 舗装計画交通量 | 疲労破壊輪数 |
|-------|-------|-------------------|------------|
| (旧) | (現) | (台/11・方向) | (回/10年) |
| D | N_7 | 3,000 以上 | 35,000,000 |
| C | N_6 | 1,000 以上 3,000 未満 | 7,000,000 |
| B | N_5 | 250 以上 1,000 未満 | 1,000,000 |
| A | N_4 | 100 以上 250 未満 | 150,000 |
| L | N_3 | 40 以上 100 未満 | 30,000 |
| | N_2 | 15 以上 40 未満 | 7,000 |
| | N_1 | 15 未満 | 1,500 |

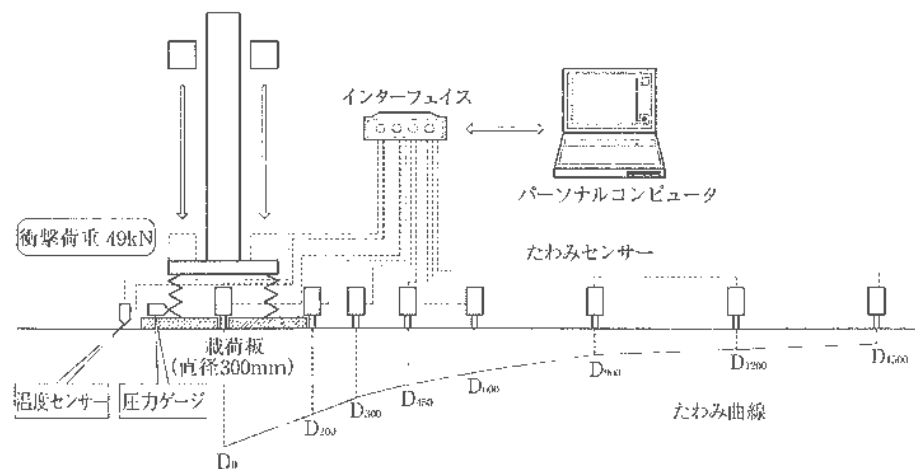


図-4.3 FWD の機構⁷⁵⁾

4.5 積雪地域の国道における劣化速度の異質性評価の実証分析

4.5.1 概要

本章で提案した重点管理区間抽出の方法論の有効性を検証するため、3章のポットホール補修箇所の耐久性分析を実施した路線で実証分析を行う。本路線では、路面性状データと舗装台帳データが整備されている。混合マルコフ劣化ハザードモデルを推計するため、2006年に本路線のドリ車線で実施された路面性状調査のデータとMICHIシステムの舗装台帳データを活用する。なお、この路面性状データは、本路線を管理する近畿地方整備局が管内直轄管理区間の路面を良好な状態に保つため、路面の状況を把握することを目的として定期的に実施している路面性状調査の結果の一部である。

路面性状データには100m間隔の測点（キロポスト）毎に平坦性、わだち掘れ量、ひび割れ率の3特性値と式(2.2)より導出されたMCIが、MICHIシステムの舗装台帳データには、舗装構造、材料構成、修繕履歴と測点情報が収録されている。この2つのデータを融合して測点20m間隔の3特性値、MCI、舗装構造、修繕履歴データに再構築する。20m間隔で整理すると3特性値ならびにMCIデータは100m間で同値となる。20m間隔で整理している理由は、舗装構造や修繕履歴が100m以下で変化しているケースがあり、100m間隔では舗装構造や修繕条件が解析に反映されないこと、現在の調査技術では20m間隔で路面性状データが取得可能であることに配慮したためである。ハザードモデルの推計において、修繕直後は路面の損傷がすべて改善されて健全度が最高のランクに回復したとみな

し、直近の修繕時点から 2006 年度の調査時点までの供用年数と健全度の関係で解析することとした。その結果、路面性状データ、舗装台帳データが共に存在する 3,309 の単位区間を有効サンプルとして得た。

表-4.2 路面の健全度ランク

| 健全度 | MCI 値の範囲 |
|-----|--------------------------|
| 1 | $8 \leq \text{MCI} < 10$ |
| 2 | $7 \leq \text{MCI} < 8$ |
| 3 | $6 \leq \text{MCI} < 7$ |
| 4 | $5 \leq \text{MCI} < 6$ |
| 5 | $4 \leq \text{MCI} < 5$ |
| 6 | $\text{MCI} < 4$ |

ここでは、パフォーマンスカーブを導出するため、MCI を路面の健全度を示す指標として採用し、表-4.2 に示すような離散的カテゴリーを用いて健全度をランク化する。表の健全度は順序尺度であり、健全度の数値や MCI 値の範囲自体に特別な意味を有していないが、最低ランクの健全度 6 については、表-2.5 に示しているように MCI 値 4 が修繕が必要とされる基準であることに配慮して設定している。また、道路区間のグルーピングに際しては、舗装台帳データに格納されている舗装構成、舗装厚さ、修繕年月および修繕厚さに関する当該区間の情報を参照した。

4.5.2 推計結果

表-4.2 の健全度ランクに基づき、健全度 6 を除く 5 つの健全度に対して混合マルコフ劣化ハザードモデルを適用し、地域区分、舗装種別、舗装構造、道路構造特性、交通量等をハザード関数の特性変数の候補としてとりあげ、それら候補のすべての組み合わせに対してハザード関数のパラメータを推計した。その中で、符号条件および t -値が 1.96 以上となる組み合わせにおいて、最終的に AIC が最小となる特性変数の組を採用した。その結果、山間部交通量、舗装種別（排水性舗装、密粒度舗装、コンクリート舗装）、道路構造特性（上・下部、橋梁、トンネル部）を選定した。これらの特性変数を用いて基準ハザード率を

$$\tilde{\lambda}_i^k = \exp(\beta_{i,1} + \beta_{i,2}x_2^{jk} + \beta_{i,3}x_3^{jk} + \beta_{i,4}x_4^{jk} + \beta_{i,5}x_5^{jk}) \quad (4.28)$$

$$(i = 1, \dots, 5)$$

と表現する。ただし、 x_2^k は山間部に該当する場合のみ交通量が付与され、それ以外は0の値をとる。なお、定量的な変数である交通量は、最大値が1となるように基準化している。 x_3^k はコンクリート舗装ならば1、そうでない場合は0となるダミー変数であり、 x_3^k が0の場合、舗装種別が排水性舗装、密粒度舗装のいずれかであることが確定する。また、 x_4^k は上工部、 x_5^k は橋梁部を表すダミー変数であり、これらのダミー変数が共に0の場合はトンネル部である。

表-4.3 混合マルコフ劣化ハザードモデルの推計結果

| 健全度 | 定数項 $\beta_{i,1}$ | 地域 $\beta_{i,2}$ | 舗装種別 $\beta_{i,3}$ | 上工部 $\beta_{i,4}$ | 橋梁 $\beta_{i,5}$ |
|------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| 1 | -1.150 (-43.33) | - (-) | -0.879 (-8.221) | - (-) | - (-) |
| 2 | -1.141 (-8.427) | 0.487 (9.868) | - (-) | 0.462 (2.966) | - (-) |
| 3 | -0.804 (-14.14) | - (-) | -2.062 (-19.34) | - (-) | -0.440 (-2.417) |
| 4 | -2.287 (-25.48) | 0.158 (3.782) | - (-) | - (-) | - (-) |
| 5 | -1.868 (-23.67) | - (-) | - (-) | - (-) | - (-) |
| 対数尤度 | | | -6709.8 | | |
| AIC | | | 13429.6 | | |

注) 括弧内は t -値を示す

前節の手順に従って未知パラメータを推計した結果を表-4.3 に示す。基準パフォーマンスカーブは特性変数の組 $x = (x_2^k, x_3^k, x_4^k, x_5^k)$ の各条件に基づいて明記している。

図-4.4 および図-4.5 に、山間部と平野部で区分したときの基準パフォーマンスカーブを示す。図-4.4 の地域区分は山間部であり、道路構造特性として上工部、橋梁部、トンネル部に分類し、それぞれに対して最小交通量と最大交通量の基準パフォーマンスカーブを示している。本区分では大半が密粒度舗装または排水性舗装のため、コンクリート舗装のパフォーマンスカーブは明記していない。図-4.5 は平野部の基準パフォーマンスカーブを示している。平野部では交通量が劣化に及ぼす影響は小さく、山間部のような交通量による違いを明確に示すことができない。なお、平野部の一部ではコンクリート舗装が採用されていることから、劣化の早い上工部に限定してコンクリート舗装の基準パフォーマンス

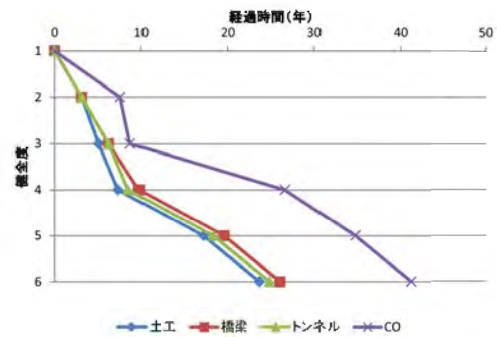
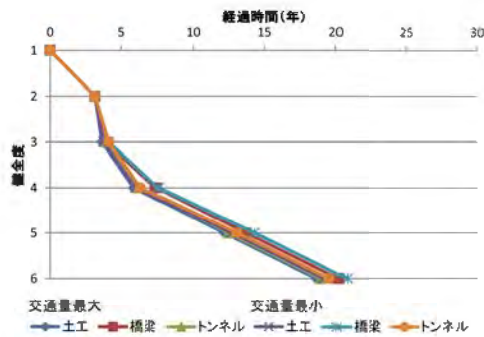


図-4.4 基準パフォーマンスカーブ（山間部）図-4.5 基準パフォーマンスカーブ（平野部）

カーブ（図中のCO）も記載している。

図-4.4 と図-4.5 をみると、土工部、トンネル部、橋梁部などの構造特性よりも、山間部、平野部の地域区分の相違が基準パフォーマンスカーブを決定づけていることがわかる。構造特性に注目すると、土工部、トンネル部、橋梁部の順に基準パフォーマンスカーブが緩やかになっているものの、これらの差は非常に小さい。また、山間部では交通量最大・最小の基準パフォーマンスカーブを併記しているが、対象区間の交通量の最小値が2,421 台/日、最大値は2,835 台/日と変動がわずかであるために差が生じていない。例えば、土工部で交通量最小の場合、健全度が6に達するまでの平均年数は19.2年、交通量最大の場合で18.7年であり、交通量による同年数の変動幅は0.5年である。一方、サンプル数は僅かであるが、平野部の一部道路区間のコンクリート舗装では41.2年で、排水性舗装、密粒度舗装と比較すると、劣化の進展が2倍程度緩やかである。

4.5.3 劣化速度の相対評価と重点管理区間の選定

各道路区間の劣化速度を相対評価するため、3,309個の単位区間を排他的なグループ k ($k = 1, \dots, K$) に分類し、グループ毎に異質性パラメータ ε^k を推計した。異質性パラメータの推計量 $\hat{\varepsilon}^k$ は、ハザード関数で考慮した特性変数以外の全ての要因が路面の劣化過程に及ぼす影響を定量化したものである。舗装の耐荷力は路面性状調査で観測できない要因であり、混合マルコフ劣化ハザードモデルにおける異質性パラメータを構成する主要な要素とみなすことができる。したがって、異質性パラメータの大きいグループを特定することにより、耐荷力の低下（舗装の構造的な劣化）が疑われる重点管理区間を効率的に抽出することが可能となる。

3,309個の道路区間をグループ化するため、橋梁、トンネル、さらに交通の分岐点である

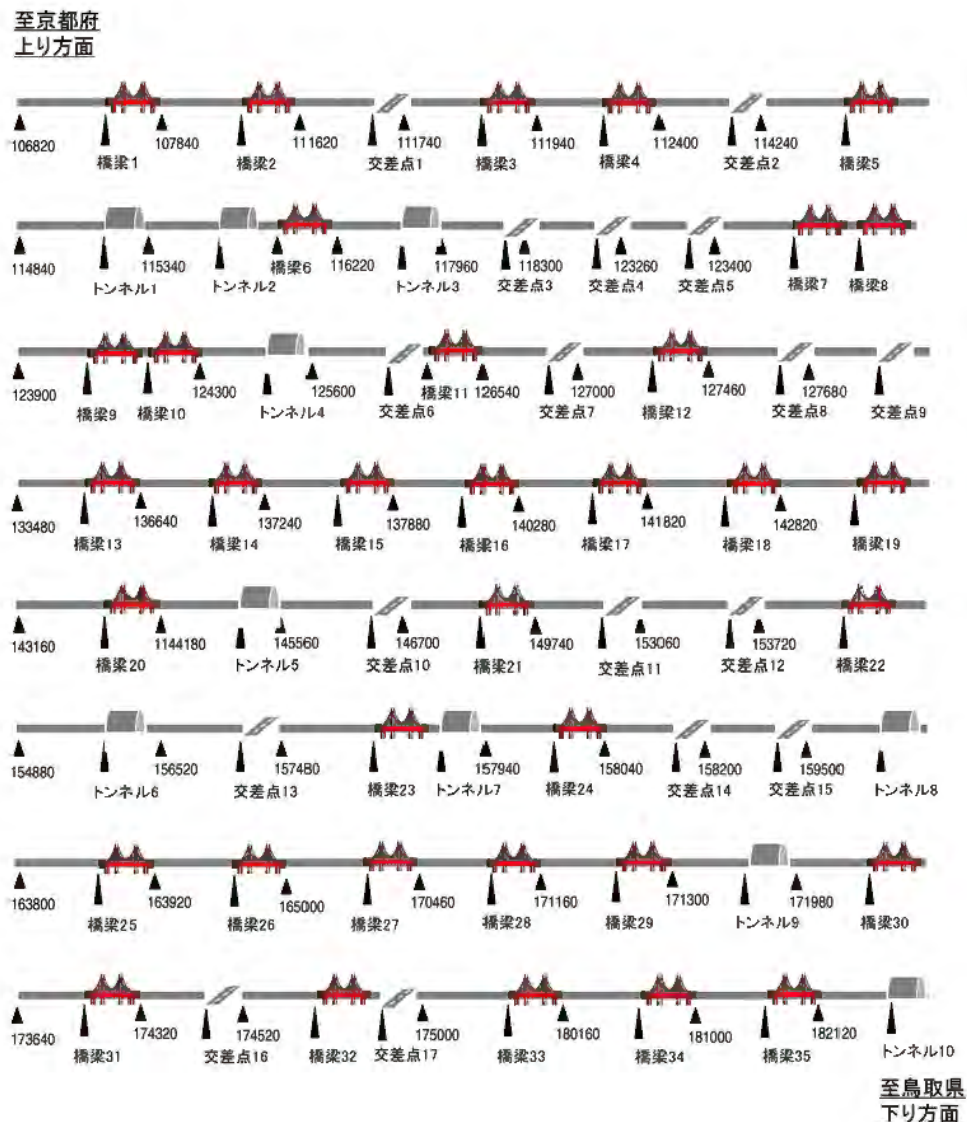


図-4.6 道路区間のグルーピング

交差点に着目して、図-4.6 のように分類した。各グループの名称は、起点となる構造物名もしくはキロポストで定義している。なお、交差点は下り線の停車線から上り線側の停車線までの区間を1つのグループとしている。このようにして道路区間を118個のグループに分類し、各グループに対して異質性パラメータを推計した結果を図-4.7に示す。同図の横軸の表記名は図-4.6の各グループの名称に対応している。また、図-4.8は、各グループの異質性パラメータの推計値 $\hat{\epsilon}^k$ と各グループ個別で算出した基準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{lk}$ の関係を示している。図中の青色の曲線は、個別ハザード率 $\hat{\lambda}_i^{lk} = \hat{\epsilon}^k \tilde{\lambda}_i^{lk}$ の値が1となる異質性パラメータ値 $\hat{\epsilon}^k$ と基準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{lk}$ の関係を表しており、これを平均ハザード曲線と定義する。同曲線より上方に位置するグループは、平均よりも路面の劣化が早いとみなされ

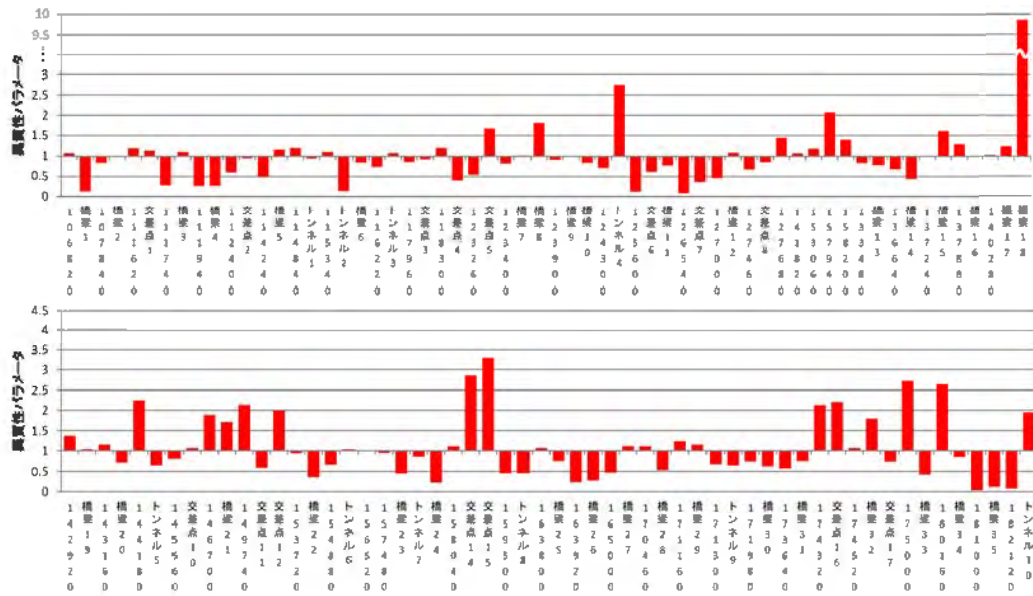


図-4.7 各グループの異質性パラメータ

る。さらに、信頼度を $(1 - \alpha) \times 100 = 90\%$ に設定し、重点管理集合 $\bar{\Omega}_{0.1}$ 、および $\hat{\Omega}_{0.1}$ を求めた。重点管理区間は、図-4.8の臨界異質性パラメータ線 ($\hat{\varepsilon}^k = \bar{\varepsilon}_{0.1}$) 上方および臨界基準曲線（式(4.27)参照）の右上方に位置しているグループが該当する。

舗装の構造的な劣化が疑われる区間のたわみ量調査は、この重点管理区間の中から選定する。調査区間の選定に際しては、交通規制による渋滞の影響、ドライバーの視距および他の工事規制の位置関係を考慮し、かつドライバーの走行性や安全性に最大限配慮して選定しなければならない。そこで、本路線を管理する豊岡国道河川事務所の担当者と協議を行い、同所の支援のもとでたわみ量調査を実施する区間を選定した。以降、調査を実施した区間を調査区間と呼び、他の道路区間と区別する。図-4.8には、選定した重点管理区間に属する調査区間のグループと重点管理区間以外の調査区間（異質性パラメータが1程度）のグループをそれぞれ赤色、緑色のプロットで示している。

各道路区間のハザード率の推計値は、式(4.19)のように異質性パラメータと基準ハザード率の推計値の積で示されることから、パフォーマンスカーブはグループの数だけ存在する。図-4.9は全118個のグループのパフォーマンスカーブを表している。個別のパフォーマンスカーブをみると、健全度6に到達するまでの年数の期待値は最も短いケースで7年、長いケースで100年以上となっており、図-4.4、図-4.5の地域区分、交通量、舗装種別、道路構造特性で分類した基準パフォーマンス曲線と大きく乖離している。これは、現実の路面の劣化過程が、地域区分、交通量、舗装種別、道路構造特性という特性変数のみでは

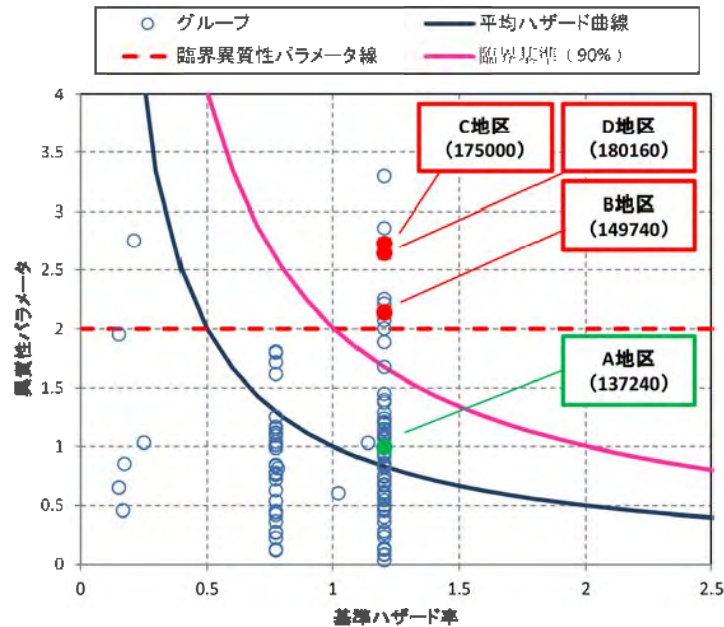


図-4.8 異質性パラメータ ε^k と基準ハザード率 $\bar{\lambda}_i$ の関係

十分に表現できないことを意味する。なお、図-4.9 の赤線は重点管理区間の調査区間，緑線は重点管理区間以外の調査区間のグループのパフォーマンスカーブを表している。

4.5.4 FWD による舗装の構造評価

FWD によるたわみ量調査は，同路線の修繕工事の実施状況等を考慮して平成 22 年の 1 月に実施した。調査区間は，グループ 137240 に属する A 地区（137.300kp～137.720kp 下り線），グループ 149740 に属する B 地区（151.720kp～152.180kp 下り線），グループ 175000 に属する C 地区（175.760kp～176.240kp 下り線），グループ 180160 に属する D 地区（180.200kp～180.680kp 下り線）の 4 地区の各 500m 区間を選定した。調査区間の詳細を表-4.4 に示す。また，図-4.10～図-4.13 に各調査区間のたわみ量と舗装構造，修繕履歴の関係を示す。なお，たわみ量調査は調査区間に対して 20m 間隔で実施しているが，舗装構造が異なる橋梁付近を測定対象から除外しているため測定点数は各調査区間で異なることに留意する必要がある。

図-4.10～図-4.13 の最上段のグラフには，たわみ量の荷重・温度補正値の代表値（補正 D0，補正 D20，補正 D150：数値は载荷位置からの距離を表す）を測点ごとに整理してい

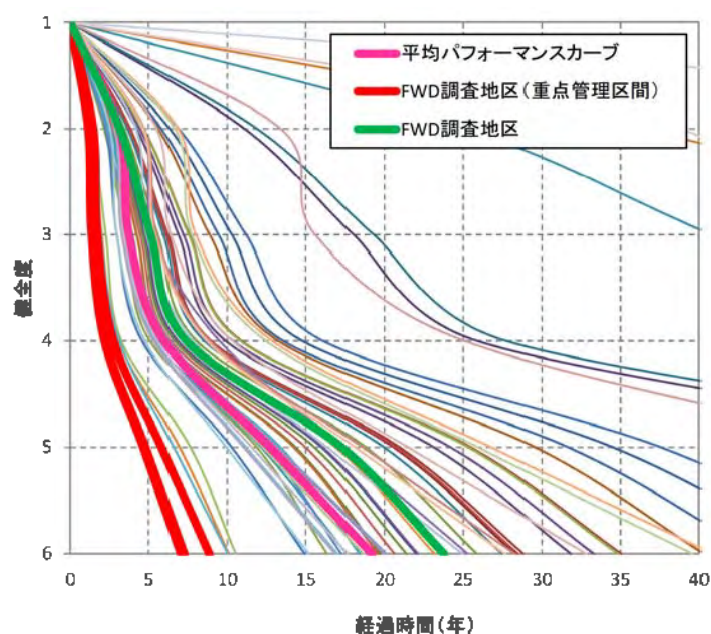


図-4.9 各グループのパフォーマンスカーブ

表-4.4 たわみ量調査区間の詳細

| 調査 地区 | 測定 点数 | 地域 区分 | 交通量 区分 | 表層の 種類 | 構造 特性 | 異質性 ϵ^k | 備考 |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|---------------------|--------|
| A 地区 | 22 | 平野部 | N6 | 排水性舗装 | 土工部 | 0.99 | - |
| B 地区 | 24 | 山間部 | N6 | 密粒度舗装 | 土工部 | 2.14 | 重点管理区間 |
| C 地区 | 25 | 山間部 | N6 | 密粒度舗装 | 土工部 | 2.72 | 重点管理区間 |
| D 地区 | 25 | 山間部 | N6 | 密粒度舗装 | 土工部 | 2.64 | 重点管理区間 |

る。たわみ量の破線は、調査区間の交通量（N6 交通）の基準値⁶⁸⁾を表しており、D0 が基準値を上回る場合、何らかの補修を行うことが望ましいとされる。また、2 段目のグラフには舗装厚、等値換算厚（TA）、たわみ量測定結果から推定した残存等値換算厚（TA0）を明記している。TA は、アスファルト舗装の路盤から表層までの全層を加熱アスファルト混合物厚さに換算したもので、現在の舗装構成から求めた値である。また、TA0 は阿部ら⁷²⁾の方法で推定したもので、推定値が TA を越える場合は TA と同値とした。さらに、3 段目のグラフには修繕が実施された年、最下段のグラフには累積修繕厚さを示しており、修繕厚さの色分けは 3 段目のグラフの凡例と対応している。

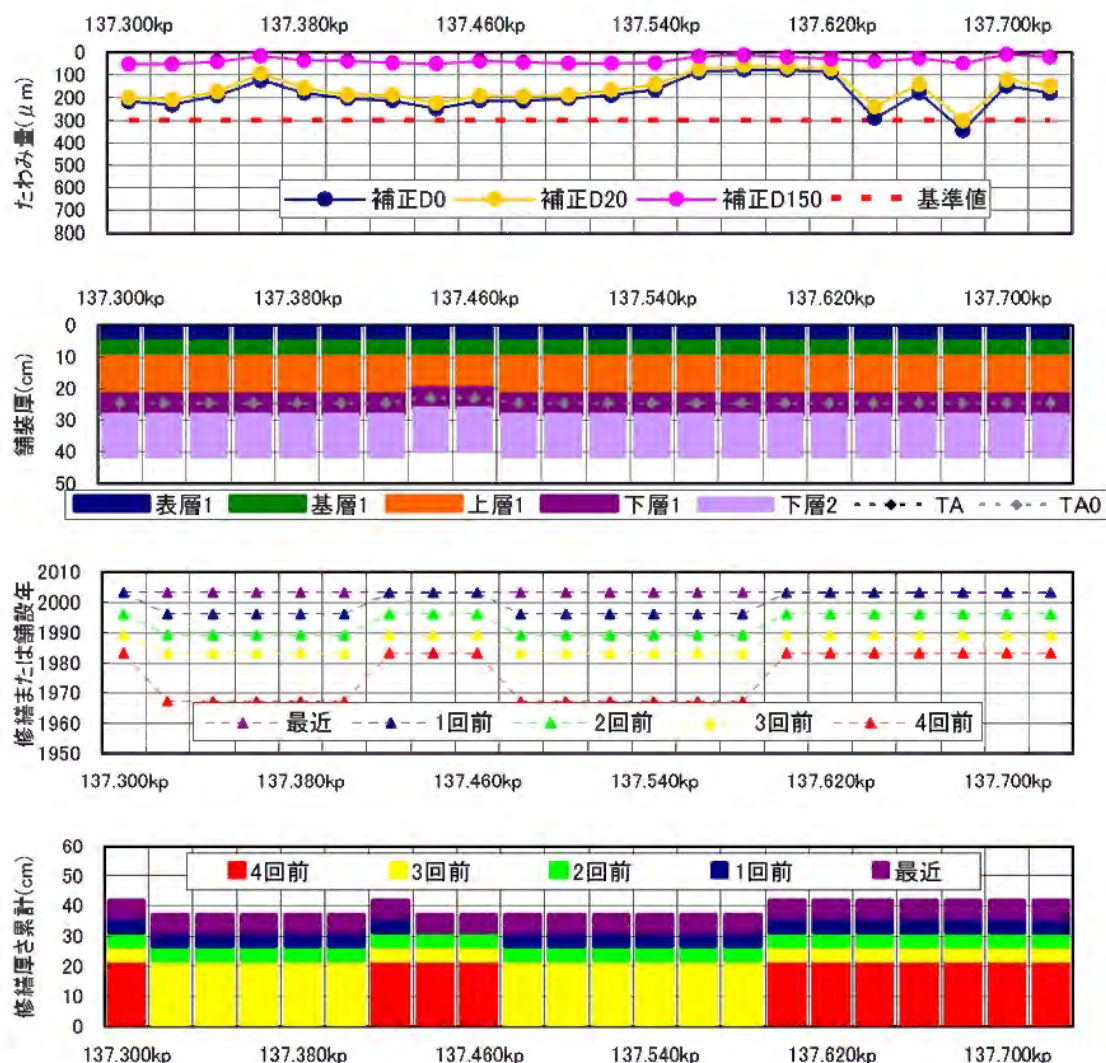


図-4.10 たわみ量と舗装構造，修繕履歴の関係（A 地区）

A 地区

A 地区のたわみ量と舗装構造，修繕履歴の関係を図-4.10 に示す。本地区の舗設年は1967年で，1980年代初めに上層路盤打ち換えが行われている。同図より，A 地区のたわみ量 D0 は基準値の $300\mu\text{m}$ をほとんどの区間で下回っていることが分かる。

B 地区

B 地区のたわみ量と舗装構造，修繕履歴の関係を図-4.11 に示す。本地区の舗設年は1964年で，1980年代後半から90年初めにかけて短期間で表層の修繕が繰り返し実施されている。調査区間の前半部では修繕履歴が明確でない区間（151.720kp～151.780kp）が存在する。たわみ量 D0 は同地区の調査区間の約4割の測定箇所では基準値を上回っているが，上層

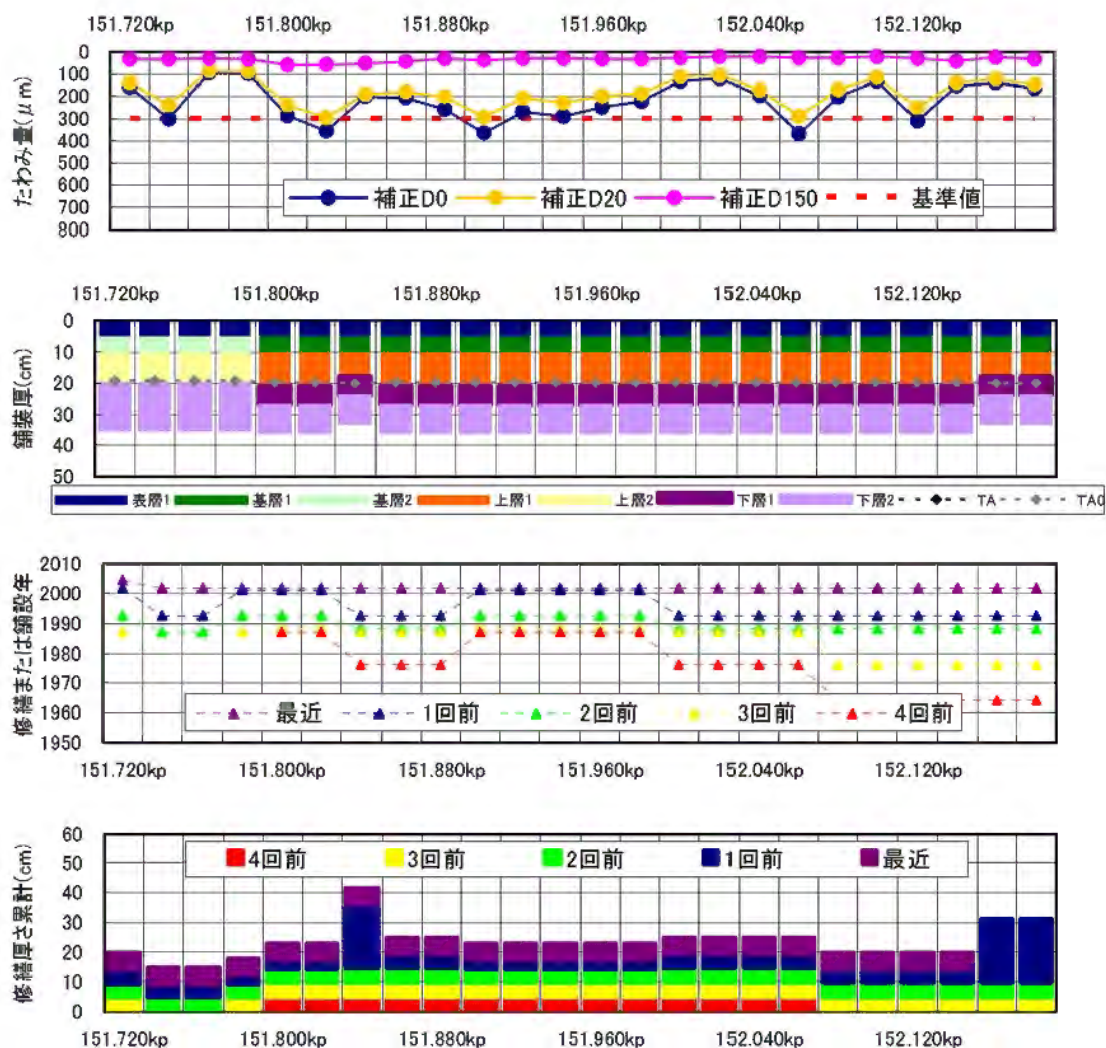


図-4.11 たわみ量と舗装構造，修繕履歴の関係（B地区）

路盤打ち換え工法が採用されている一部の区間（図中の 151.840kp 付近および 152.160kp より後半）では小さい。

C地区

C地区のたわみ量と舗装構造，修繕履歴の関係を図-4.12に示す，本地区の舗設年は1967年で，過去の修繕履歴から表層のみ修繕が行われていることが分かる．1981年には薄層オーバーレイが行われているが，修繕厚さの情報はデータベースに存在しない．たわみ量は全体的に大きく，全体の5割以上でD0が基準値を上回っている．なお，図中の175.980kp地点に関する修繕履歴の情報は舗装台帳データから欠落しているため，同地点の舗装厚，修繕実施年，累積修繕厚さをグラフに表記していない．

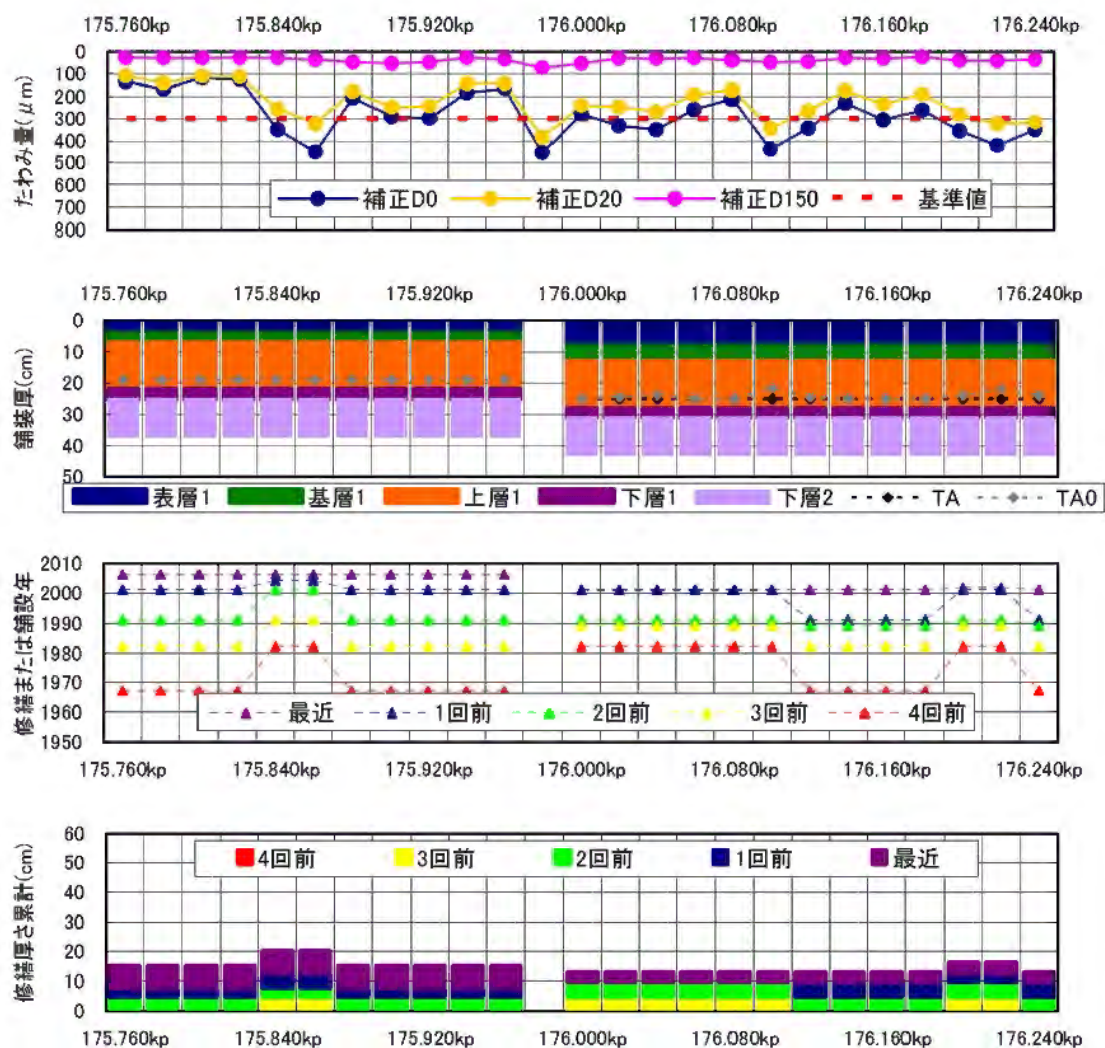


図-4.12 たわみ量と舗装構造，修繕履歴の関係（C地区）

D地区

D地区のたわみ量と舗装構造，補修履歴の関係を図-4.13に示す。舗設年は不明で，局所打ち換え工法が1994年に採用されている。また，2007年に180.200kp～180.590kpまで表層切削オーバーレイ，180.590kp以降は表層・基層切削オーバーレイが実施されている。なお，修繕履歴データのMICHIデータベースは2006年時点のものであり，それ以降の修繕情報が無いため同図には反映されていない。たわみ量が基準値を上回っている道路区間は少ないが，一部区間でたわみ量が大きな値を示している。また，全調査区間の中でD150の平均値が最も大きく，若干ではあるが路床の支持力が低下している可能性がある。

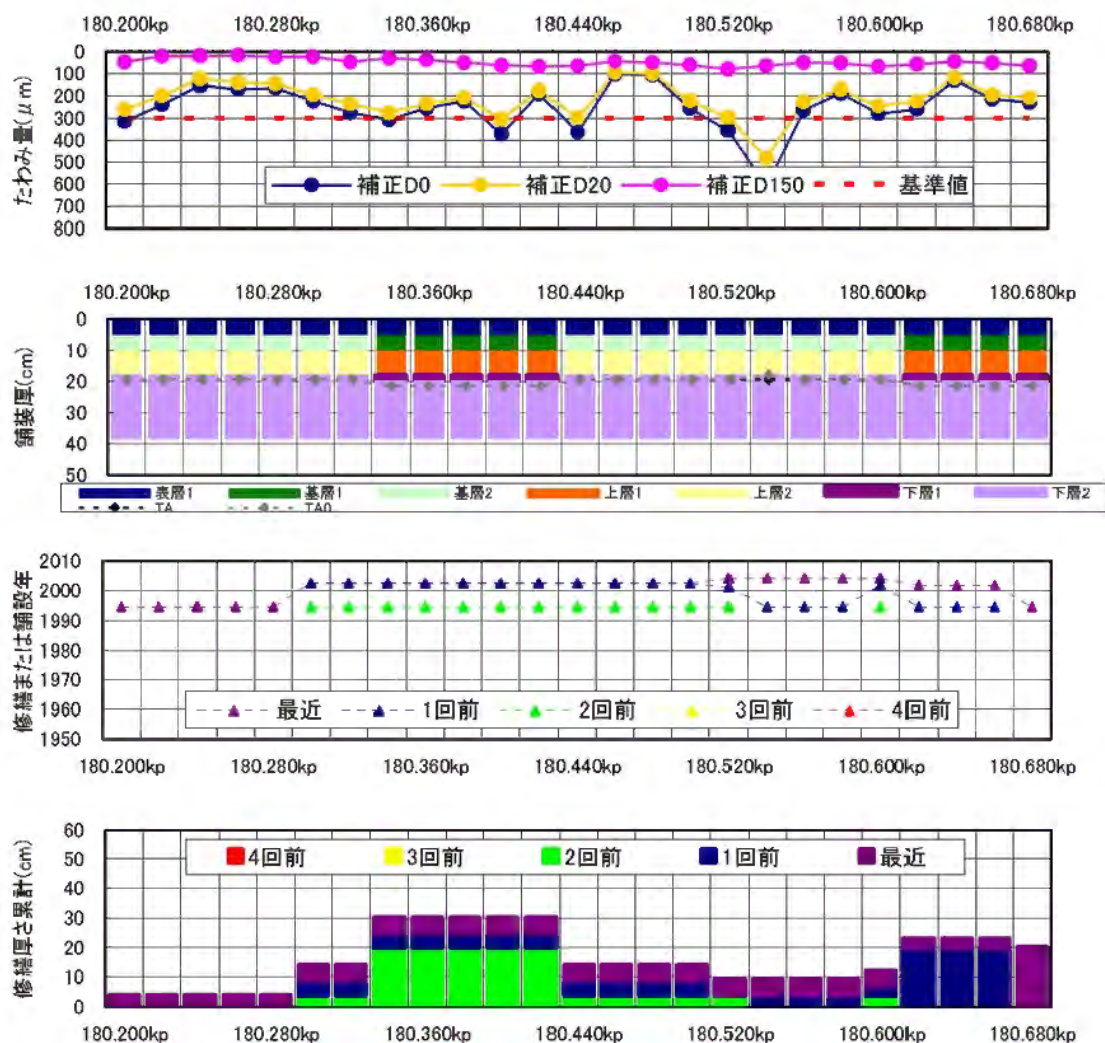


図-4.13 たわみ量と舗装構造，修繕履歴の関係（D地区）

4.6 本章の考察

舗装路面の劣化過程は，舗装の種類，交通量，道路構造により異なる．さらに舗装の耐荷力が低下した路線では，これらの条件が同じであっても修繕後の早期に路面のパフォーマンスが低下する可能性がある．したがって，舗装の修繕に際しては，路面の状態だけでなく構造的な劣化状況を正しく把握して，修繕が必要な層を特定することが重要である．ところが，構造的な劣化を評価するための構造調査は，交通規制を伴うこと，路面性状調査と比較して調査費用が高いことから全路線で同調査を実施することは現実的でない．本章では，構造的な劣化がハザード率の異質性で表現できることに着目し，混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて異質性の高い区間のグループから構造的な劣化が疑われる重点

管理区間を特定する手法を提案した。また、実証分析では同モデルを積雪地域の道路に適用し、異質性の高い区間とそうでない区間で FWD を用いたたわみ調査を実施すると共に、同区間の修繕履歴を参照した。

実証分析の結果から、調査区間の中で路床支持力の低下といった深刻な舗装構造の劣化が生じているケースは存在しないものの、異質性パラメータの推計値 ε^k の大きいグループに属する調査区間ではたわみ量が基準値を上回っている地点が多いことが判明した。異質性の値が標準的な A 地区と大きいグループ B, C, D 地区の修繕履歴をみると、A 地区のみ上層路盤の打ち換えが全区間で行われている。一方、たわみ量の大きな地点が存在する B, C, D 地区ではアスファルト混合物層（表層、基層）より下の層の修繕履歴が僅かである。単なる修繕履歴データの欠落ではなく現実に修繕が行われていないとすれば、同地区では路盤の支持力低下が疑われる。このように、実証分析の限られたサンプルではあるものの、本章で示した方法論は重点管理区間の抽出に有効であると考えられる。

舗装の維持管理において本手法を適用することの有意性は、観測可能な劣化要因とそれ以外の観測が困難な要因（主に舗装の耐荷力）に分離して劣化速度を相対比較し、直接観測できない後者の要因の影響を間接的に評価できる点に見出すことができる。また、異質性の高い箇所から構造的な損傷箇所を抽出する手法は、いわば過去の繰り返し修繕と構造的な劣化の関係という道路管理者のみ知りうる経験的な知見が見える形にしたものといえる。一方、異質性は舗装構造の劣化以外の要素も含んでいる。異質性の高い箇所の修繕履歴を詳細に分析して早期劣化の原因を究明し、今後の修繕計画を見直すことが重要である。

第5章 修繕に用いる望ましい舗装材料の選択

5.1 総説

道路管理における基本事項は、道路のおかれている様々な状況に応じて道路管理者が定めるべきものとされている。舗装の修繕に際して、道路管理者は技術基準を参照しながら修繕に用いる舗装材料を複数の候補の中から選択する。このとき、道路管理者は基準を満たす材料から無作為に選択するのではなく、類似の修繕事例の情報や自身の経験で得た知見に基づいて望ましいと思われる材料を選択すると考えられる。ところが、彼らが参考にする情報や知見は、“ある条件で材料を選択した結果”であり、選択した材料以外の結果が欠落した不完全な情報といえる。修繕時の各条件（損傷の程度、地形条件、気象条件、交通条件）が耐用年数に影響すると考えた場合、耐用年数の情報から材料間の耐久性を精度良く評価することは難しい。とりわけ条件によって材料が特定されるようなケースでは評価結果に歪みが生じる。

本章では、こうした不完全な情報を用いながら望ましい材料を選択する方法論を提案する。そのため、まず4章で示した混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて材料固有の劣化特性を評価する。次いで、欠落した情報の不確実性を考慮した材料選択モデルを構築し、モデルの概要を示す。また、事例研究として先の融合データを用いて望ましい舗装材料の選定を試みる。

5.2 基本的な考え方

5.2.1 修繕に用いる材料の選択メカニズム

修繕に用いる舗装材料の耐久性を相対評価する最も簡便な方法は、修繕履歴データの中から舗装材料以外の条件が一致するものを集計して耐用年数やパフォーマンスカーブを比較することである。ところが、試験的に同一区間、同時期に複数の材料で修繕されるケースを除けばこうしたデータはほとんど得られない。実際には、幾つかの条件により材料が限定されることもあり、条件によって特定の材料以外の情報が存在しないこともある。例えば、重交通路線のアスファルト舗装路面では、路面温度が高くなる夏季に流動わだちが

生じやすい。そのため、車道及び側帯の舗装の構造の基準に関する省令において、表-5.1の塑性変形輪数の基準値が設けられている。

表-5.1 塑性変形輪数の基準値

| 区分 | 舗装計画交通量 | 塑性変形輪数 |
|----------------------------------|-------------|------------------|
| | (単位 1口につき台) | (単位 1ミリメートルにつき回) |
| 第1種、第2種、第3種第1級 及び第2級並びに第4種第1級 | 3,000以上 | 3,000 |
| | 3,000未満 | 1,500 |
| その他 | - | 500 |

塑性変形輪数は、省令で「舗装道において、舗装の表層の温度を60℃とし、舗装路面に49kNの輪荷重を繰り返し加えた場合に、当該舗装路面が下方に1mm変位するまでに要する回数で、舗装の表層の厚さおよび材質が同一である区間毎に定められるものをいう」と定義されており、現地における繰り返し載荷試験あるいは室内試験で確認できるものとされている。

塑性変形輪数を現道で評価する場合、測定時の温度管理が困難であること、破壊試験であるため試験後の道路は供用に適さないことから、一般的には試験温度を60℃、輪荷重を49kNに設定したホイールトラッキング試験（以降、WT試験と称す）で確認する方法が採用されている。WT試験機は、英国のTRRL（Transportation and Road Research Laboratory：現TRL）で開発されたアスファルト混合物の耐流動性を評価する装置である。我が国では、昭和42年から53年にかけて国道14号幕張地内で実施された大規模な試験舗装において、同装置を用いた試験結果と現地のわだち掘れ量の間に相関関係が見られたことから、耐流動性を評価する室内試験法として注目されるようになった⁷⁷⁾。その後、小田桐ら⁷⁸⁾は、高架橋上のアスファルト舗装のわだち掘れの進行をWT試験で得られる動的安定度（DS）と供用状況（車両速度、舗装温度、通行車両の輪荷重、交通量、車両あたりの平均軸数）から推定する手法を考案した。さらに伊藤ら⁷⁹⁾は、直轄国道の一部に調査区間を設け、わだち掘れの進行量と調査期間内の累積交通量、輪荷重、車両の走行速度、気温を観測し、これらの条件ならびに設計期間を所与としたときの動的安定度の目標値を算定する手法を提案した。

図-5.1は、アスファルト混合物の種類と動的安定度の関係の一例を示したものである。動的安定度は、試験開始45分後から60分後までの試験輪の走行回数をその間の沈下量で除して求める。塑性変形輪数を室内で評価する場合も同様の方法で求めるが、試験輪の輪

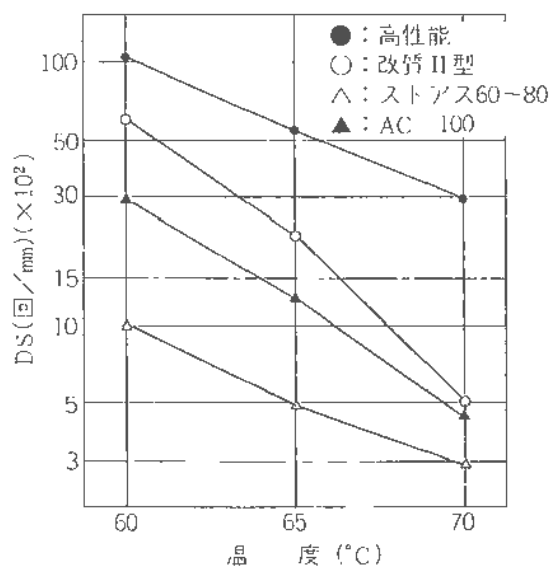


図-5.1 アスファルト混合物の種類と動的安定度の関係例

荷重が異なる。これは、動的安定度は混合物の耐流動性、塑性変形輪数は舗装に求める性能を評価することを目的としているためである。いずれにしても、塑性変形輪数の基準値や動的安定度の目標値により混合物が限定される場合、物性値（塑性変形輪数や動的安定度など）がある閾値を超えた混合物のみ修繕に適用され、耐用年数が観測される。このように特定の舗装材料のみ選択されてその情報が観測されるようなメカニズムを選択メカニズムと呼ぶ。

5.2.2 欠測の弊害

選択メカニズムにより、基準値や目標値を満足しない混合物は修繕に適用されないため、その混合物に関する観測値が欠測する。図-5.2は、これを概念的に示している。こうしたケースで観測された情報のみで解析を行うと、次のような弊害が生じる可能性がある。

相関関係の不明瞭化

図-5.2において、混合物の物理性状と耐用年数の関係が全て観測される場合は、これらの間に相関関係を見出すことができる。ところが、塑性変形輪数の基準値等により図の閾値以下の情報が観測されなければ、閾値以下の情報を含めた本来の相関関係が得られない。その結果、混合物の物理性状と耐用年数の正確な相関関係を得ることができず、物理性状

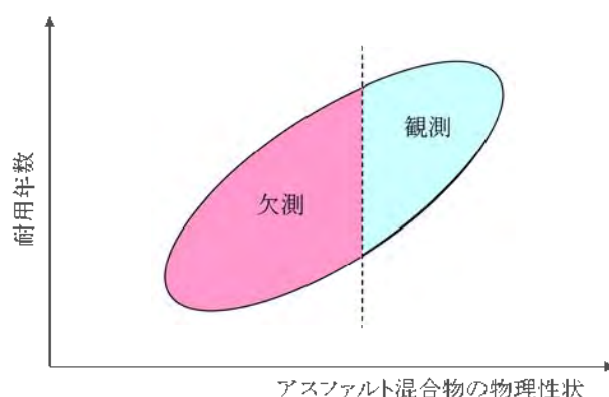


図-5.2 欠測データと観測データ

の高い混合物を適用した際の耐久性向上効果を正しく評価できないという問題が発生する。視点を変えると、これは「ある材料に関する情報が特定条件のみで観測され、その他の材料について欠測する不完全な情報」のために生じる問題といえる。

共変量の影響

閾値によって混合物の種類が限定されても、多くの情報が得られれば（結果として物性値と耐用年数の相関関係を見出すことができれば）図-5.2の耐用年数の観測値のみで解析が可能な錯覚が生じる。ところが、観測値が閾値以外の要因で限定されるような場合、多くの情報が得られても解析結果に歪みが生じる。例として、表層・基層の修繕を考える。修繕に際しては、舗装の破損形態（わだち掘れ、ひび割れ、磨耗など）を考慮して、経済的かつ望ましい組み合わせで表・基層混合物を選択する。そのため基層の混合物の種類によって表層の混合物が特定されることが考えられる。その結果、表層混合物の耐用年数に関する情報は特定の基層混合物においてのみ得られ、さらに耐用年数も基層混合物の影響を受ける。表層混合物の選択、耐用年数の双方に影響を与えるような変数（ここでは基層混合物）を共変量という。表-5.1の塑性変形輪数も共変量と見なすことができる。塑性変形輪数の規定は適用可能な混合物を限定するが、塑性変形輪数の基準が設けられている道路では交通量が多く、交通量そのものも耐用年数に影響する。このように、解析の対象から特定の条件の情報だけが得られている（選択されている）状況で単純な解析を行うと同結果に歪みが生じることを選択バイアスという。図-5.2のような単純な欠測も選択バイアスの1つとみなされる。

5.2.3 選択バイアスの処理法

特定の情報だけが観測されるために生じる選択バイアスの問題を解決するため、幾つかのモデルが提案されている。Tobin⁸²⁾が考案したトービットモデルでは、閾値によって情報が観測される確率と欠落する確率の同時生起確率を最大化するように分布関数のパラメータを推定することで閾値の問題を解決している。また、Heckman⁸³⁾は、情報が欠落するかどうかを幾つかの説明変数を用いてプロビット推定し、これを用いて対象とする事象の関係を最小2乗法で推定する2段階推定法（ヘキット）を考案した。一方、Manskiは、観測されない選択肢に関して共変量で割り付けられた選択結果の同時生起確率の取り得る範囲から望ましい選択をする選択モデルを考案している⁸⁴⁾。トービットモデルやヘキットは、バイアス処理した相関関係を利用して望ましい選択肢を特定する。一方、Manskiのモデルは、共変量で割り付けた選択肢の期待効用の取り得る範囲から、最適な選択肢を決定する。トービットモデルを用いる場合は、閾値が明確である必要がある。また、ヘキットを適用する場合、観測できない変数が多ければ推定精度が低下する。Manskiのモデルでは、共変量で選択結果に大きな偏りがある場合、観測されない選択結果の生起確率の取り得る範囲が広くなることに留意する必要がある。

5.2.4 望ましい舗装材料とその選択の考え方

舗装の望ましい材料とは、“地域特有の舗装の劣化要因とその対策を鑑みて、耐久性が高いと認められる安価かつ将来にわたって調達可能なもの”といえる。そこで、4章で採用した混合マルコフ劣化ハザードモデルを用い、材料別にパフォーマンスカーブを推計する。4章では、同じ舗装構造の道路区間でグループ化し、異質性の高い区間を抽出した。本章では、表層・基層混合物の組み合わせでグループ化し、各グループの異質性を材料固有の劣化特性とみなす。

繰り返し述べているように、舗装の修繕履歴の情報は“ある条件で特定の材料を用いた結果”であり、他の材料に関する情報が欠落した不完全情報である。そのため、選択されない材料に関する情報の不確実性を排除することができない。さらに、5.2.2でも述べているような共変量の問題も存在する。そのため、劣化が早いグループか遅いグループかを判定できても、異質性の大小のみで最も耐久性が高い材料を特定することはできない。ここでは、Manskiが考案したモデルを用いて不確実性を含む情報から望ましい材料を選択す

ることとし、各材料の耐用年数期間の生存確率を不確実さを含む生存確率の範囲で表現し、ミニマックスリグレット基準で望ましい材料を判定する。

5.3 舗装材料選択モデル

5.3.1 生存確率の推定

4.3.2 の混合マルコフ劣化ハザードモデルでは、モデルを適用する路線の道路を舗装構造、舗装の種類、環境条件で同質的な区間で構成される K 個グループ $k(k = 1, \dots, K)$ に分類し、グループ k の固有な劣化速度の異質性を ε^k で表現した。ここでは、同質的な材料で構成される表・基層のグループを考える。まず、舗装路面の耐用年数を“路面の健全度が最高ランク ($i = 1$) から最も低いランク ($i = I$) に移行するまでの期間”と定義し、最低ランク I を寿命に達した状態とみなす。また、材料の耐久性を修繕後の期間 z の間に寿命に達しない確率（生存確率）で表現する。グループ k の異質性パラメータの推計値 $\hat{\varepsilon}^k$ が得られたとき、修繕を実施してから z 期経過した時点のグループ k の生存確率 $P(Y_z^k)$ は、式 (4.6) および (4.8) より、

$$\begin{aligned} P(Y_z^k) &= 1 - \pi_{1I}^{lk}(z : \hat{\varepsilon}^k) = \sum_{j=1}^{I-1} \pi_{1j}^{lk}(z : \hat{\varepsilon}^k) \\ &= \sum_{j=1}^{I-1} \sum_{s=1}^j \psi_{1j}^s(\tilde{\lambda}^{lk}) \exp(-\tilde{\lambda}_s^{lk} \hat{\varepsilon}^k z) \end{aligned} \quad (5.1)$$

と表すことができる。ただし、 $\tilde{\lambda}^{lk} = (\tilde{\lambda}_1^{lk}, \dots, \tilde{\lambda}_{I-1}^{lk})$ である。また、 $\psi_{1j}^s(\tilde{\lambda}^{lk})$ は、

$$\psi_{1j}^s(\tilde{\lambda}^{lk}) = \begin{cases} \prod_{v=1, \neq s}^{j-1} \frac{\tilde{\lambda}_v^{lk}}{\tilde{\lambda}_v^{lk} - \tilde{\lambda}_s^{lk}} & j > 1 \text{ の時} \\ 1 & j = 1 \text{ の時} \end{cases} \quad (5.2)$$

である。なお、 $\tilde{\lambda}_s^{lk}$ はグループ k の単位区間 l^k が有する健全度 s の平均的なハザード率である。式 (4.14) より、 $\tilde{\lambda}_s^{lk}$ はグループの道路区間の特性変数ベクトル \mathbf{x}^{lk} に依存しており、グループ k の生存確率は k が属する道路区間の特性の影響を受ける。そこで、区間全体の平均的な道路特性を表す特性ベクトル $\hat{\mathbf{x}}$ を

$$\hat{\mathbf{x}} = \frac{\sum_{l^k=1}^{L^k} l^k \mathbf{x}^{lk}}{\sum_{k=1}^K L^k} \quad (5.3)$$

とし、式 (4.14) から平均ハザード率を

$$\tilde{\lambda}_s = \exp(\hat{\mathbf{x}} \beta'_s) \quad (5.4)$$

と定義すれば,

$$\begin{aligned}
 P(Y_z^k) &= 1 - \pi_{1I}^{lk}(z : \varepsilon^k) = \sum_{j=1}^{I-1} \pi_{1j}^{lk}(z : \varepsilon^k) \\
 &= \sum_{j=1}^{I-1} \sum_{s=1}^j \psi_{1j}^s(\lambda) \exp(-\lambda_s \varepsilon^k z)
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

となる。式 (5.5) はグループ k の材料が区間全体を通じて平均的な路面に適用された場合の生存確率を表している。次に、グループ k の特定の層の材料を選択肢としたときの生存確率を考える。選択肢の材料を ν_a 、他の層の材料を ν_a の選択に一定の影響を与える共変量を w_b とすると同式は、

$$P(Y_z^k) = P(Y_z^k | \nu_a, w_b) \tag{5.6}$$

となる。上式で、 K 個全てのグループは選択肢の A 個の材料および B 個の共変量のいずれかに属する。したがって、選択肢 ν_a と共変量 w_b が特定されればグループ k が判明する。ここで、選択肢の材料に関する共変量の条件付き生存確率を考える。 w_b のもとでグループ k が z 期間生存する条件付き確率 $P[Y_z^k(\nu_a) | w_b]$ は、

$$P[Y_z^k(\nu_a) | w_b] = P[Y_z^k | \nu_a, w_b] P(\nu_a | w_b) + P[Y_z^k(\nu_a) | \nu_{\neq a}, w_b] P(\nu_{\neq a} | w_b) \tag{5.7}$$

と表すことができる。上式の右辺 2 項の $P[Y_z^k(\nu_a) | \nu_{\neq a}, w_b]$ は、共変量 w_b のもとで選択肢 ν_a が選択されなかったケースで、もし選択された場合の生存確率を表している。これは実際には観測されないため、

$$P[Y_z^k(\nu_a) | \nu_{\neq a}, w_b] = [0, 1] \tag{5.8}$$

である。したがって、

$$\begin{aligned}
 P[Y_z^k(\nu_a) | w_b] &= P(Y_z^k | \nu_a, w_b) P(\nu_a | w_b) + P(Y_z^k(\nu_a) | \nu_{\neq a}, w_b) P(\nu_{\neq a} | w_b) \\
 &= [P(Y_z^k | \nu_a, w_b) P(\nu_a | w_b), P(Y_z^k | \nu_a, w_b) P(\nu_a | w_b) + P(\nu_{\neq a} | w_b)]
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

の範囲をとる。

5.3.2 舗装材料選択モデル

道路管理者は、複数の舗装材料から修繕によって得られる効用の期待値が高い材料を選択する。道路管理者の効用は、選択した材料を用いて修繕した結果、修繕箇所が長期間生

存することでもたらされる便益とその材料コストで表すことができる。ここでは簡略化のため、耐用期間の目標値に対して同期間生存する確率が最も高い材料を選択すれば期待効用が最大になるケースを考える。各材料の生存確率は不確実性を有するため、式 (5.9) のような範囲で示される。道路管理者は不確実な情報に基づいて、正しい選択によって得る便益と誤った選択による損失の差を最小限に抑えるように材料を選択する（すなわちミニマックスリグレット基準で材料を選択する）ものとし、道路管理者が各材料の生存確率の下限值と上限値に注目し、双方の選択ミスによる後悔が最も小さくなるように材料を選択すると仮定する。

このとき、各材料の生存確率の下限值と上限値は、式 (5.9) より、

$$\inf P[Y_z^k(\nu_a)|w_b] = P(Y_z^k|\nu_a, w_b)P(\nu_a|w_b) \quad (5.10)$$

$$\sup P[Y_z^k(\nu_a)|w_b] = P(Y_z^k|\nu_a, w_b)P(\nu_a|w_b) + P(\nu_{\neq a}|w_b) \quad (5.11)$$

である。ここで、

$$\begin{aligned} \max_{k \in K} \left\{ \inf P[Y_z^k(\nu_a)|w_b] \right\} &= q_0 \\ \max_{k \in K} \left\{ \sup P[Y_z^k(\nu_a)|w_b] \right\} &= q_1 \end{aligned}$$

とすれば、 q_0, q_1 は、それぞれ生存確率が最大となる選択肢の生存確率の下限值と上限値を表す。このとき選択ミスによる後悔の大きさは q_0, q_1 を用いて

$$R_z^{k^1} = q_0 - \inf P[Y_z^k(\nu_a)|w_b^k] \quad (5.12)$$

$$R_z^{k^2} = q_1 - \sup P[Y_z^k(\nu_a)|w_b^k] \quad (5.13)$$

と表すことができる。したがって、最も後悔の小さい選択肢のグループ \hat{k} は、

$$\hat{k} = \min_{k \in K} \left\{ \max[R_z^{k^1}, R_z^{k^2}] \right\} \quad (5.14)$$

である。

5.4 選択モデルの適用事例

5.4.1 概要

前章と同じ路線のデータに選択モデルを適用し、同路線の舗装の修繕工事で実際に用いている舗装材料から望ましい材料を選択する。舗装台帳データに記載されている舗装材料

に関する情報は修繕毎に更新されるため、過去の材料の情報は得られない。それでも各層の材料の組み合わせパターンは非常に多く存在する。変量の影響を評価するためには、代表的な材料の組み合わせで劣化速度の異質性を評価することが望ましい。舗装の修繕工事では、一般的に切削オーバーレイや表層・基層切削工法が採用されていること、路盤以下の層に関しては耐荷力が修繕工法の選択に寄与しているが路盤材の種類そのものは表・基層の材料選択にさほど影響しないと考えられることから、ここでは表層・基層の混合物の組み合わせでグループ化し、選択モデルを適用する。

表-5.2 は、舗装台帳データに記載されている代表的な表層と基層のアスファルト混合物の組み合わせを示している。表中のバインダの“H 型”はポリマー改質アスファルト H 型，“ストアス”はストレートアスファルト，“改質 II”はポリマー改質アスファルト II 型である。また、骨材の“再生”とは、アスファルト混合物に使用する粗骨材の一部にアスファルト再生骨材を用いていることを表す。図-5.3 より、建設廃棄物の中でアスファルト舗装の廃材の再資源化率は平成 12 年以降 98%を越えており、現道の舗装の取り壊しや切削で発生した廃材は路盤材やアスファルト混合物の骨材として再生利用されている。現在、再生加熱アスファルト混合物への利用率は約 60%にとどまっており、今後は再生アスファルト混合物への利用率も高めていくことが求められている⁸⁶⁾。こうしたことから密粒度舗装の路面を修繕する場合、資源の有効利用の観点から再生密粒度アスファルト混合物や再生粗粒度アスファルト混合物を使用するケースが多い。なお、表中の密粒度アスファルト混合物においてストアス－新規骨材の組み合わせが存在しないのは、同混合物を表層に適用した際の基層混合物のデータが非常に少ないためである。

表-5.2 表・基層混合物の代表的な組み合わせ

| 表層 | | | 基層 | | |
|------------------------------|-------|----|----------------------|-------|----|
| 混合物 (舗装種類) | バインダ | 骨材 | 混合物 | バインダ | 骨材 |
| ポーラス アスファルト混合物 (排水性舗装) | H 型 | 新規 | 粗粒度 アスファルト 混合物 | ストアス | 再生 |
| | | | | 改質 II | 新規 |
| 密粒度 アスファルト混合物 (密粒度舗装) | ストアス | 再生 | 粗粒度 アスファルト混合物 | ストアス | 再生 |
| | | | | ストアス | 新規 |
| | 改質 II | 再生 | 粗粒度 アスファルト混合物 | ストアス | 再生 |
| | | | | 改質 II | 再生 |
| | | 新規 | 粗粒度 アスファルト混合物 | ストアス | 再生 |
| | | | | | 新規 |

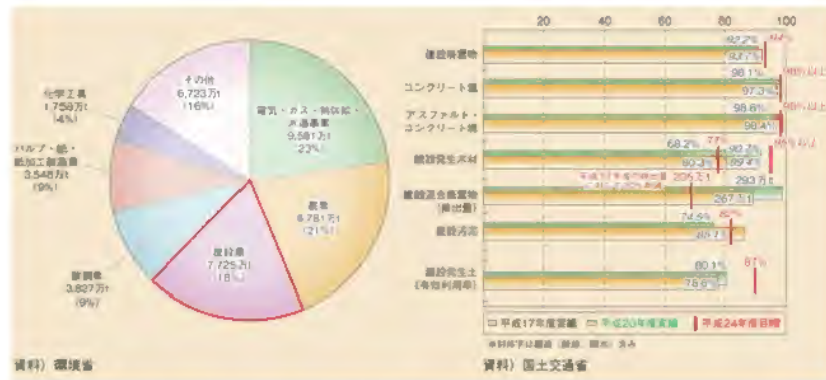


図-5.3 産業廃棄物の分野別排出量と建設副産物の品目別再資源化率¹⁰⁾

前章では、舗装の劣化特性を示す特性変数として t -値が 1.96 以上の山間部交通量、舗装種別、道路構造を選定した。表-5.2 の組み合わせでグループ化して混合マルコフ劣化ハザードモデルを推計する場合、上記の変数を考慮する必要がある。さらに材料固有の劣化特性を異質性で評価するためには、構造的な劣化の程度を示す変数も考慮しなければならない。そこで、構造的な劣化を示す特性変数として、舗装後の繰り返し修繕回数（または打ち換え後の繰り返し修繕回数）を新たに組み入れる。なお、排水性舗装については、試験的に施工された区間を除けば表層の混合物にはポリマー改質アスファルト H 型のバインダを用いたポーラスアスファルト混合物が適用されており、同舗装の基層には密粒度舗装と同じ混合物が用いられている。基層混合物の選択問題が密粒度舗装で解決できることから、ここでは密粒度舗装のみを対象とする。

以上の前提条件により、表-5.2 の組み合わせを有する密粒度舗装区間の 386 個のデータを対象にハザードモデルを推計する。

5.4.2 ハザードモデルの推計結果

ハザード関数の特性変数として、道路構造、修繕工法、土地区分（平地・山地・市街地）、繰り返し修繕回数、修繕厚さを候補としてとりあげ、ハザード関数のパラメータの推計を行った。その中で、符号条件および t -値が 1.96 以上となる候補のうち AIC を最小にする説明変数の組を採用した結果、繰り返し修繕回数と土地区分を特性変数として採用した。これらの特性変数を用いて $\tilde{\lambda}_i^{lk}$ を具体的に書き表すと、

$$\tilde{\lambda}_i^{lk} = \exp(\beta_{i,1} + \beta_{i,2}x_2^k + \beta_{i,3}x_3^k) \quad (5.15)$$

$$(i = 1, \dots, 5)$$

となる。ただし、 x_2^k は繰り返し修繕回数、 x_3^k は市街地の場合は1、それ以外は0の値をとるダミー変数であり、修繕回数は最大値が1になるように基準化している。4章で示した手順に従ってパラメータを推計した結果を表-5.3に、各グループの表・基層混合物の組み合わせと異質性パラメータの関係を表-5.4に示す。また、各グループのパフォーマンスカーブを図-5.4に示す。さらに、 x_2^k 、 x_3^k に式(5.3)の平均的な特性値を付与して異質性のみを考慮したパフォーマンスカーブを図-5.5に示す。図-5.4から、グループDの組み合わせが最も早く寿命に達しているが、異質性のみを考慮した図-5.5ではグループAの期待寿命が最も短く、グループDの期待寿命は3番目に長い。グループDは繰り返し修繕回数の多い区間で適用（平均6.2回）されており、同区間の舗装の構造的な耐荷力の低下が路面の寿命に影響していると考えられるが、材料面で必ずしも耐久性が劣るとはいえない。

表-5.3 ハザードモデルのパラメータ推計結果

| i | 定数項 $\beta_{i,1}$ | 繰り返し修繕回数 $\beta_{i,2}$ | 上地区分（市街地） $\beta_{i,3}$ |
|------|----------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 | -1.302 (-12.92) | 1.687 (6.247) | - (-) |
| 2 | -0.130 (-1.986) | - (-) | 0.808 (2.073) |
| 3 | -0.878 (-6.916) | - (-) | 0.839 (2.299) |
| 4 | -3.017 (-7.886) | 3.936 (3.492) | - (-) |
| 5 | -4.737 (-2.592) | 10.597 (2.227) | - (-) |
| 対数尤度 | -690.97 | | |
| AIC | 1401.9 | | |

注) 括弧内はt-値を示す

5.4.3 選択モデルの適用結果

本研究では、修繕に用いる望ましい舗装材料を耐久性が高いと認められる安価かつ将来にわたって調達可能なものとしている。路面の設計期間が短ければ経済的な（安価な）材料が、設計期間が長ければ耐久性の高い（寿命の長い）材料が望ましい材料となることから、

表-5.4 混合物の組み合わせと異質性パラメータ推計結果

| 表層 | | | 基層 | | | 異質性 | | サンプル 数 |
|----------------------|-------|----|---------------|-------|----|-----|-----------------|-----------|
| 混合物名 | バインダ | 骨材 | 混合物名 | バインダ | 骨材 | k | ε^k | |
| 密粒度 アスファルト 混合物 | ストアス | 再生 | 粗粒度 AS 混合物 | ストアス | 再生 | A | 1.612 | 44 |
| | | | | | 新規 | B | 0.880 | 111 |
| | 改質 II | 再生 | 粗粒度 AS 混合物 | ストアス | 再生 | C | 1.045 | 148 |
| | | | | 改質 II | 再生 | D | 0.930 | 35 |
| | | 新規 | 粗粒度 AS 混合物 | ストアス | 再生 | E | 0.974 | 29 |
| | | | | ストアス | 新規 | F | 0.772 | 19 |

注) AS はアスファルトの略である

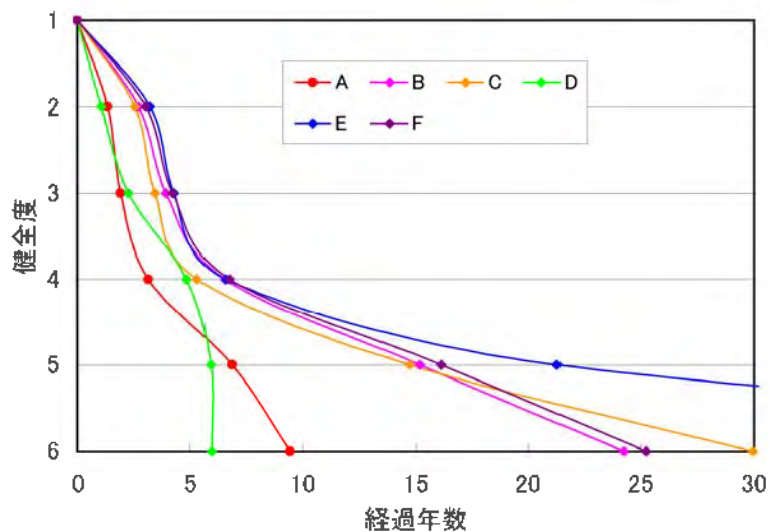


図-5.4 表・基層混合物組み合わせのパフォーマンスカーブ 1

路面の設計期間は非常に重要な意味を持つ。路面の期待寿命は、図-5.5 の基準パフォーマンスカーブより約 19 年である。舗装の維持管理問題を解決するためには、現状よりも材料のさらなる耐久性向上が求められることから、本研究では、図-5.5 で最も寿命が長い分類 F を目標に設計期間を 25 年とし、同期間路面が生存する確率から望ましい材料の選択を試みた。

表-5.5、表-5.6 に修繕後 25 年経過した時点の共変量の条件付き生存確率と選択基準のリグレットマトリックスを示す。生存確率 1, 2 は、各共変量の条件付き生存確率の下限值と上限値である。一方、 R_{25}^{k1} , R_{25}^{k2} は生存確率の下限值、上限値の最大値と各選択肢 k の生存確率の下限值、上限値の差をとったもので、誤った選択の後悔の大きさを表している。ま

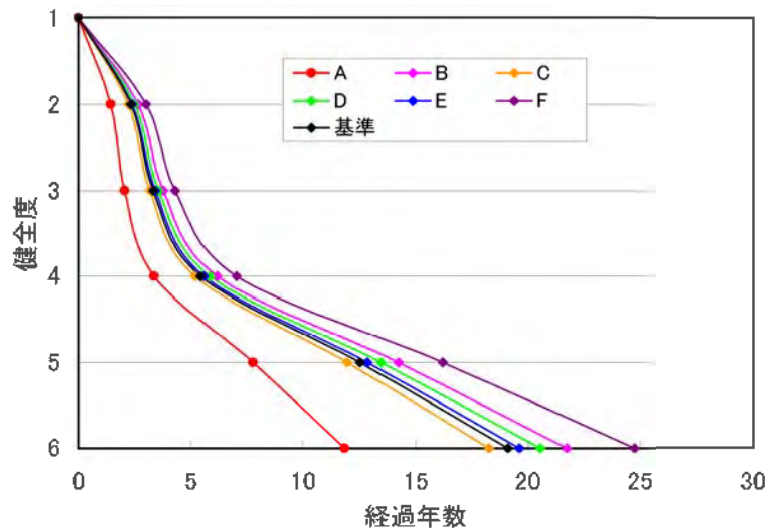


図-5.5 表・基層混合物組み合わせのパフォーマンスカーブ2（異質性のみ考慮）

た， $\max[R_{25}^{k1}, R_{25}^{k2}]$ は各選択枝の後悔の最大値（マックスリグレット）である．表-5.5 より，表層の材料に着目した場合のマックスリグレットはグループFが最も小さく，2番目にEが小さい．グループF,E共に表層は新規骨材を用いた改質II型密粒度アスファルト混合物である．また，表-5.6より，基層においてもグループFのマックスリグレットが最も小さく，グループDが2番目に小さい．グループFの基層は新規骨材を使用した粗粒度アスファルト混合物，グループDの基層は再生骨材を使用した改質II型再生粗粒度アスファルト混合物である．これらの結果から，ミニマックスリグレット基準で判定すると，グループFの表・基層混合物の組み合わせを選択することが望ましい．一方，前述のとおりアスファルト舗装は再資源化率が高く，舗装用骨材やアスファルトバインダという限りある資源を有効利用するという観点から，再生骨材を積極的に活用することが求められる．こうしたことから，本研究では表層は新規骨材を用いた改質II型密粒度アスファルト混合物，基層は荷重や雨水に直接晒されないことを考慮して2番目にリグレットが小さいグループDの再生骨材を用いた改質II型再生粗粒度アスファルト混合物を修繕に用いる”望ましい材料”と判断する．

5.5 本章の考察

道路管理者は，舗装の損傷状況から最も望ましいと思われる工法・材料を選択して修繕を行う．彼らが望ましいと考える材料は，過去の修繕履歴や管理者の知見に拠るところが

表-5.5 生存確率と選択基準（表層）

| グループ | 生存確率 1 | 生存確率 2 | $R_{25}^{k^1}$ | $R_{25}^{k^2}$ | $\max[R_{25}^{k^1}, R_{25}^{k^2}]$ |
|-------|--------|--------|----------------|----------------|------------------------------------|
| A | 0.01 | 0.81 | 0.27 | 0.10 | 0.27 |
| B | 0.27 | 0.42 | 0.01 | 0.50 | 0.50 |
| C | 0.14 | 0.47 | 0.14 | 0.44 | 0.44 |
| D | 0.28 | 0.28 | 0 | 0.63 | 0.63 |
| E | 0.03 | 0.90 | 0.25 | 0.01 | 0.25 |
| F | 0.06 | 0.91 | 0.22 | 0 | 0.22 |
| q_0 | 0.28 | - | - | - | - |
| q_1 | - | 0.91 | - | - | - |

表-5.6 生存確率と選択基準（基層）

| グループ | 生存確率 1 | 生存確率 2 | $R_{25}^{k^1}$ | $R_{25}^{k^2}$ | $\max[R_{25}^{k^1}, R_{25}^{k^2}]$ |
|-------|--------|--------|----------------|----------------|------------------------------------|
| A | 0.01 | 0.73 | 0.22 | 0.13 | 0.22 |
| B | 0.23 | 0.51 | 0 | 0.35 | 0.35 |
| C | 0.17 | 0.36 | 0.06 | 0.50 | 0.50 |
| D | 0.05 | 0.86 | 0.17 | 0 | 0.17 |
| E | 0.15 | 0.55 | 0.08 | 0.32 | 0.32 |
| F | 0.17 | 0.77 | 0.06 | 0.10 | 0.10 |
| q_0 | 0.23 | - | - | - | - |
| q_1 | - | 0.86 | - | - | - |

大きい。本章では、修繕履歴の情報や管理者の知見が（選択した舗装材料以外の結果が得られないという意味で）不完全なものであることを指摘し、不完全な情報を用いて望ましい舗装材料を選択する方法論を提案した。

適用事例では、表・基層共に最も耐久性が高いと思われる混合物の組み合わせを選択することが望ましいという結果を得た。同時に資源の有効利用や調達性に配慮した場合、交通荷重や降雨の影響を直接を受けない基層には再生骨材を用いた混合物を選択することが望ましいことを示した。なお、望ましい材料は、舗装の設計期間によって異なる。提案した選択モデルにおいても、設計期間が短ければ適用事例の多い材料のリグレットが、設計期間が長ければ適用事例の少ない材料のリグレットが小さくなる。その結果、設計期間が短いほど適用事例の多い経済的な材料が、設計期間が長いほど適用事例の少ない（高価で

耐久性が高いと思われる）材料が望ましい材料となる。こうした意味で本研究で提案した選択モデルは、単純なモデルではあるものの実際の選択の嗜好を表現していると考えられる。とはいえ、より確かな材料選択を行うためには修繕履歴の情報を精査して選択されない材料の生存確率の範囲を特定するようなモデルの開発が望まれる。

第6章 社会実験的なアプローチによる舗装材料の継続的改善

6.1 総説

修繕後の舗装の耐久性を向上させるためには、4章や5章の方法論を用いてベンチマーキングを行い、構造的な問題が生じている箇所の適切な修繕や望ましい材料が選択されるように維持管理法を改善することが重要である。同時に、修繕工法や舗装用骨材、アスファルトバインダ等の舗装材料の新技术を積極的に導入することは、舗装の耐久性向上のみならず舗装技術の継続的な改善にも寄与すると考えられる。舗装材料に関しては、近年、重交通路線、寒冷地、橋梁、排水性舗装用に高品質なポリマー改質アスファルトが開発されている。また、現道における不具合発生の原因究明や室内試験による検証等によって舗装の破壊のメカニズムが解明されていく中で、耐摩耗性や耐流動性など舗装に求められる性能を向上させたアスファルト混合物、簡易的な補修工法⁸⁸⁾や効率的に耐久性を向上させる舗装工法⁸⁹⁾も生まれている。

舗装技術の継続的な改善により一層の耐久性向上を実現するためには、維持管理上の問題を明らかにして原因を究明すること、新しい技術を活用しながらベンチマーキングを実施してベストプラクティスを導き出し、工法や材料の基準の見直しをすることが重要である。

一方、新しい技術の導入に際しては、従来では起こりえなかった想定外の事態の発生、あるいは導入コストに見合う効果が得られないというリスクも存在することに留意する必要がある。本章では、修繕にかかる舗装技術の中でも舗装材料に着目して社会実験的なアプローチで新しい舗装技術の導入効果を評価し、これを継続的に改善するための方法論を提案する。具体的には、修繕に用いる舗装材料の観点から舗装技術の継続的な改善を実現するための方針を示し、社会実験的に修繕を実施するプロセスとそのための必要項目を整理する。また、実証分析として社会実験的な試験施工の概要を示し、試験施工箇所の追跡調査結果を踏まえて試験施工の妥当性を検証する。

6.2 基本的な考え方

6.2.1 舗装材料の継続的改善の方針

修繕に用いる舗装材料は舗装の維持管理の成否に係わる重要な要素であることから、道路管理者は地域特有の舗装の破損形態を考慮しながら最適な材料を選択しなければならない。最適な材料とは、その地域におけるベストプラクティスの舗装材料を意味する。最適な材料は固定的なものではなく、問題の発見－材料の開発－新たな問題の発見－改善された材料の開発の繰り返しの中で更新される。したがって前章で示した望ましい材料は、ある時点において最適な材料となりうるが、常に最適な材料であるとは限らない。材料の更新は、維持管理上の技術的な問題が無くなるまで、あるいは材料に改善の余地が無くなるまで継続する。

新しい材料を含めたベストプラクティスを導入して舗装の維持管理の改善を図るためには、実績に基づいた望ましい材料や新しい材料等を用いて同一条件で修繕を実施する、修繕箇所のモニタリング結果からパフォーマンスの相対評価を行う、評価結果を踏まえて材料の基準の見直しを図ることが必要である。その第一段階では、材料に起因する維持管理上の問題点を抽出し、問題解決すべき対象を明確にする。次の第二段階では、対象の材料群から当該地域で最も望ましいと思われるものを選定すると共に問題解決に寄与する新しい材料を開発あるいは選定する。第三段階では、第二段階で選定された望ましい材料と新たな材料、経済的な材料等を用いて現道で試行的に修繕を実施する。最後の第四段階では、試行箇所の相対評価の結果を踏まえて当該地域におけるベストプラクティスを見出し、以降の維持管理方針に反映するために材料の基準の見直しを図る。こうして4つの段階からなるプロセスを繰り返す実践することで、舗装材料の継続的な改善が実現する。この改善フローを図-6.1に、図に示した項目の具体的な実施事項を以下に示す。

6.2.2 舗装材料の継続的な改善のための必要事項

問題点の抽出と改善対象の設定

舗装の維持管理の問題は地域によって異なる。例えば、気象条件、交通条件、材料の調達性など、地域が直面している問題は多岐にわたる。したがって道路管理者は、維持管理の問題点を明らかにし、その原因を究明して最も効果的に問題解決を図るために、改善すべ

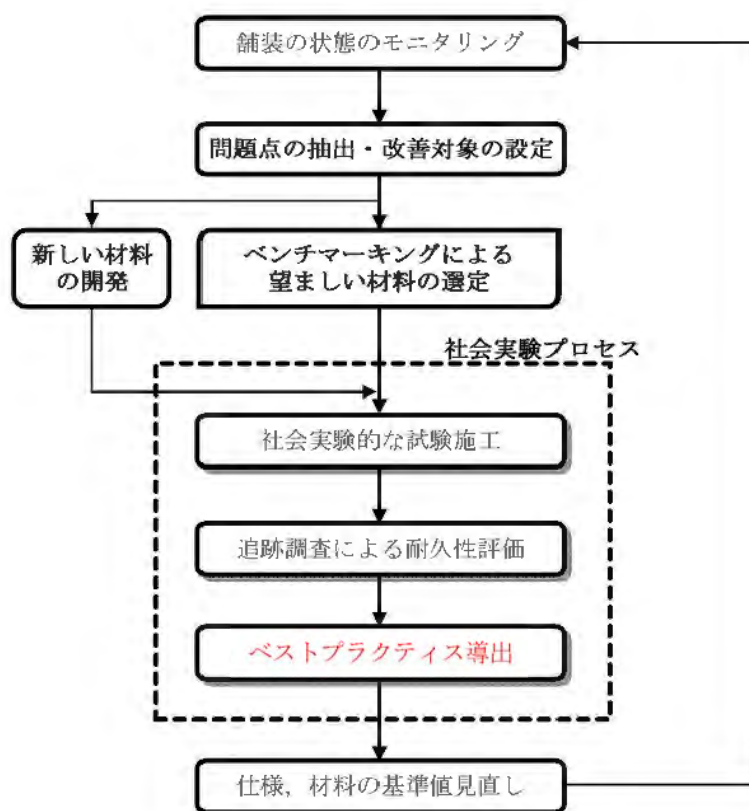


図-6.1 修繕に用いる舗装材料の継続的改善フロー

き対象を設定しなければならない。舗装の修繕後の早期破損の問題を採り上げた場合、改善すべき対象は破損が生じている層の修繕に用いる舗装材料が該当する。

望ましい材料の選定と新しい材料の開発

修繕に用いる望ましい材料とは、安価で長期にわたって調達可能な耐久性の高い舗装材料である。実績のある材料の中から望ましい材料を選定する目的は、同材料を採用することで平均的な舗装のパフォーマンスカーブの底上げを図ること、新しい材料との相対評価を実施し、より良い材料を選択する機会や根拠を示すことである。したがって、望ましい材料を正しく選定することは、舗装材料の継続的な改善を実現する上で重要な事項といえる。また、新しい材料とは一層の耐久性向上が期待できる舗装材料であり、既往の研究成果等を踏まえて設定した基準を満足するものである。

社会実験的な試験施工の実施

社会実験とは、新たな施策の展開や円滑な事業執行のため、社会的に大きな影響を与える可能性のある施策の導入に先立ち、市民等の参加のもとで場所や期間を限定して施策を試行・評価するものとされている⁹⁰⁾。社会実験の導入のメリットとして、地域が抱える問題解決に向けた施策の有効性を試行的に評価することで施策導入の是非を事前に検証できること、パブリックインボルブメントにより事業に対する住民の合意形成に寄与することがあげられる。我が国では、道路交通に関する社会実験が大半を占めており、パークアンドライド、スマート IC、道路空間の効率的な利用等で社会実験が実施されている。また、国土交通省の道路局では、社会実験の公募を行い、各自治体が実施する社会実験を支援しており、これを受けて実施された成果も報告している⁹¹⁾。

舗装の修繕に新しい材料を導入する場合、費用対効果が低い、あるいは想定外の不具合が生じて早期に破損するというリスクが存在する。そのため、実績の乏しい新しい材料を導入する前に社会実験的に試験施工を実施し、既存の材料との相対評価を実施する必要がある。試験施工を実施することで得られる便益として、新しい材料の適用性を事前に評価して上記のリスクを回避または軽減できること、ベストプラクティスの選定が可能になることがあげられる。その反面、複数の材料を修繕に用いるため追加コストが生じる。また、試験施工の方法や材料の設定によっては、当初の目的を達成できないというリスクも存在する。したがって、試験施工の計画立案に際しては、修繕が必要な箇所を選定して追加コストの負担を軽減すること、材料以外の劣化要因が無視できる区間かつ万一問題が生じても速やかに補修が可能な箇所を選定することが重要である。材料と修繕箇所の候補が決定すれば、試験施工体制を整えて試験施工を行う。

追跡調査による耐久性評価

一般的な社会実験では、実験開始後に進捗状況を観察し、必要に応じて実験内容が見直される。また、実験後は結果を分析して施策の導入の可否を判定すると共に社会実験の評価結果が公表される。一方、修繕の試験施工では、試験施工後の経過観察で路面のパフォーマンスを評価する。その最も単純な方法は試験施工後の路面の寿命を導出することであるが、結果を得るまで非常に長い時間を要するため、新しい材料を採用する機会が失われることが懸念される。

こうしたことから、定期的に試験施工箇所の追跡調査等のモニタリングを行い、パフォーマンスの変化を観察する。なお、試験施工後の早期の追跡調査では、パフォーマンスの変化が材料によるものかどうか判定することは難しい。そのため、現地から採取した供試体を用いて室内試験を実施し、追跡調査の結果を検証することが望ましい。

ベストプラクティスの導出と仕様，材料基準の見直し

追跡調査による各材料の評価結果を踏まえて当該地域における修繕材料のベストプラクティスを導出する。さらに、ベストプラクティスの材料の物性値を参照して材料の基準を改定し、今後の舗装の維持管理で同基準を活用する。このようにして、修繕に用いる舗装材料を継続的に改善する。

6.3 舗装技術の継続的改善に向けた実証分析

6.3.1 対象地域における舗装維持管理の現況と課題

本章で提案した社会実験的な修繕の方法論の有用性を検証するため、3～5章と同じ路線の道路を対象に実証分析を行う。本路線は兵庫県の北部地方に位置し、豪雪地帯に指定されており、山間地域の例年の累積積雪量は400cm以上、冬季の最低気温は氷点下5℃以下で夏季の最高気温は30℃を超える環境にある。本路線の特徴として、山間地帯では密粒度舗装が、市街地や平野部では排水性舗装の割合が高い。これは、融雪散水装置の設置箇所の多い山間地帯では密粒度舗装、騒音対策が必要な市街地や平野部ではタイヤ／路面騒音の低減効果の高い排水性舗装が適用されていることによる。図-6.2は本路線における表層の種類と構成比、図-6.3は各舗装に占める山間部、平野部、市街地別の割合を表している。

本路線で採用されている修繕工法の一覧とその割合を表-6.1に示す。表の数値は、舗装台帳データの対象区間下り線における過去5回の修繕履歴情報から導出したものである。修繕工法の割合とは、全修繕延長に対する各修繕工法の施工延長比である。本路線の道路の大部分は、1960年代半ばに舗設されてから40年以上経過しており、同一箇所でも複数回の修繕が行われている。したがって、表に示す値は路線延長比でない。表-6.1より、本路線の舗装の修繕で最も多く採用されている工法は表層の切削オーバーレイ工法であり、全体の過半数を占める。次いで打ち換え工法の割合が高い。打ち換え実績のヒストグラムを

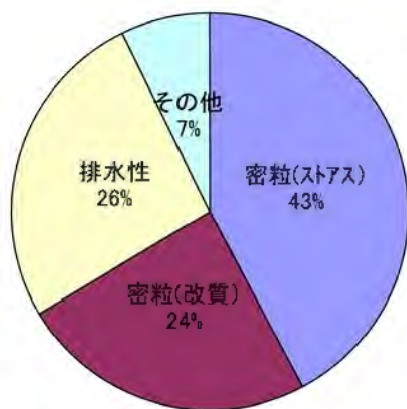


図-6.2 表層の種類と構成比

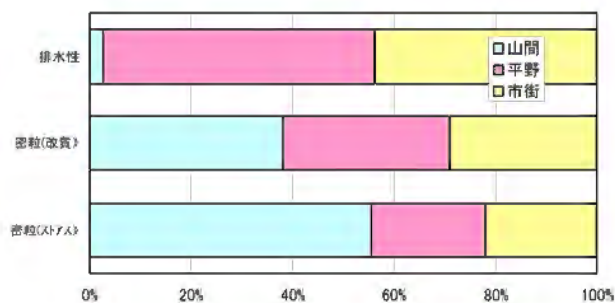


図-6.3 沿道環境と各種舗装の構成の関係

表-6.1 過去5回の修繕履歴における修繕工法一覧

| 工法 | 延長 (km) | 割合 (%) |
|--------------|--------------|-------------|
| 新設 | 11.6 | 5.0 |
| 打ち換え工法 | 34.0 | 14.8 |
| 上層路盤打ち換え工法 | 11.3 | 4.9 |
| 表層・基層打ち換え工法 | 13.3 | 5.8 |
| 局部打ち換え工法 | 6.5 | 2.8 |
| オーバーレイ工法 | 10.3 | 4.5 |
| 薄層オーバーレイ工法 | 6.9 | 3.0 |
| 切削オーバーレイ工法 | 128.5 | 55.7 |
| 切削薄層オーバーレイ工法 | 6.7 | 2.9 |
| その他 | 1.5 | 0.6 |

図-6.4 に示す。打ち換え工法は 1960 年代半ばと 1990 年代初めに多く採用されているが、それ以降の実績は非常に少ない。

6.3.2 耐久性向上に寄与する新しい舗装材料の提案

本地域は豪雪地帯に指定されていることから分かるように、冬季は走行車両のタイヤチェーンによる路面の摩耗わだちが生じやすい。また、路線の設計交通量は N_5 ないし N_6 交通であり、鳥取から京都に抜ける交通網として比較的に大型車の交通量も多く、流動わだちの発生も懸念される。流動わだちは、夏季の路面温度上昇によるアスファルト混合物の軟化や骨材のアスファルト被膜がはく離して耐荷力を失った混合物層に交通荷重が作用して発生するもので基層でも生じる。特に、表層のみを切削して密粒度舗装から排水性舗

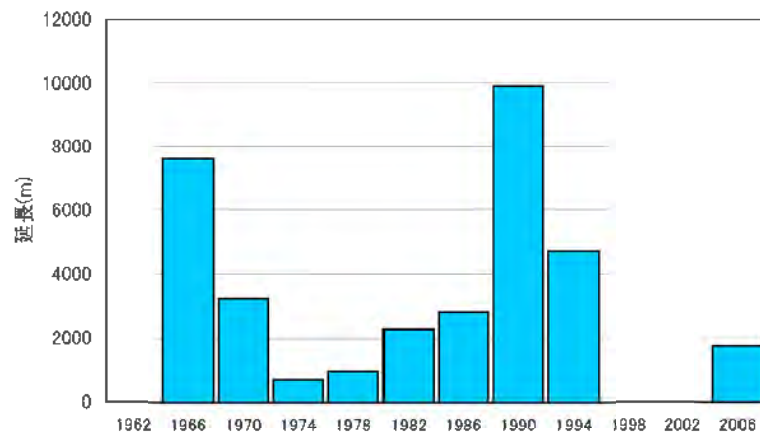


図-6.4 打ち換えの実績

装に修繕した路線において、基層混合物の骨材のはく離が生じて早期に流動わだちが発生した事例が報告されている⁸⁷⁾。磨耗わだちが生じた路面では走行車両による振動や騒音の増大、流動わだちが生じた路面ではハンドルとられや降雨時のハイドロプレーニング現象の発生など、周辺環境の悪化や走行安全性の低下が懸念される。

以上から、本地域においては、冬季のタイヤチェーンによる路面の磨耗、路面温度上昇あるいは滞水による流動わだちの発生が舗装の維持管理における最も大きな問題と考える。そこで、舗装の耐摩耗性、耐流動性を向上させるため、積雪地域の各地方整備局が発行する「土木工事共通仕様書」のアスファルト舗装に関する技術基準をベンチマークとして当該地域の表層・基層用の骨材および混合物の物理性状の基準値を設定する。

舗装用骨材

アスファルト混合物用の骨材には、砕石、玉砕、砂利、鉄鋼スラグ、砂および再生骨材等があり、使用する骨材の材質や粒度は舗装の性状に影響する。特に積雪地域の舗装は、融雪散水や車両のタイヤチェーンなど過酷な環境に晒されることから、骨材の吸水量、すり減り減量、安定性損失量の基準を高く設定し、さらに骨材の静的はく離抵抗性の基準を新たに加える。これを表-6.2に示す。

表-6.2 表・基層用アスファルト混合物の骨材の基準値

| 項目 | 粗骨材 | | 細骨材 | |
|---------------------------|---------|---------|--------|--------|
| | 密 粒 | 排水性 | 密 粒 | 排水性 |
| 表乾密度 (g/cm ³) | 2.5 以上 | 2.5 以上 | 2.5 以上 | 2.5 以上 |
| 吸水率 (%) | 2.5 以下 | 2.5 以下 | - | - |
| すり減り減量 (%) | 30 以下 | 15 以下 | - | - |
| 安定性損失量 (%) | 10 以下 | 10 以下 | 10 以下 | 10 以下 |
| 粘土・粘土塊 (%) | 0.25 以下 | 0.25 以下 | - | - |
| 軟石量 (%) | 5 以下 | 5 以下 | - | - |
| 細長・扁平石片 (%) | 10 以下 | 5 以下 | - | - |
| はく離抵抗性 (%) | 15 以下 | 15 以下 | - | - |

アスファルト混合物

舗装の耐摩耗性を向上させるためにアスファルト量の多い密粒度アスファルト混合物を適用すると、夏季にアスファルトが軟化して流動わだちが生じやすい。そこで、同じ問題の対策を講じている北陸地方整備局の骨材配合の基準を参照する。また、ポーラスアスファルト混合物については、骨材飛散防止の観点から北海道開発局の仕様を参考にする。基層の混合物については滞水によるアスファルト被膜のはく離が流動わだちの原因となっていることから、排水性舗装の場合は原則として改質Ⅱ型粗粒度アスファルト混合物を適用する。表・基層のアスファルト混合物の物理性状の新しい基準値を表-6.3 に示す。

6.4 社会実験的アプローチによる試験施工

6.4.1 修繕工法と既存の望ましい材料の選定

表-6.1 より、当該地域で最も多く採用されている修繕工法は切削オーバーレイ工法である。したがって、同工法に用いる表層用のアスファルト混合物を対象として材料の改善を実施することが最も効率的である。ところが、同地域では流動わだちも早期破損の要因となっていることから基層混合物の改善も行うことが望ましい。そこで3番目に実績のある表層・基層切削工法で試験施工を実施する。なお、打ち換え工法は、近年では非常に実績が少ないこと、4章のたわみ量調査結果より重点管理区間においても路床の損傷が認められないことから検討対象から除外している。

表-6.3 アスファルト混合物の物理性状の基準値

| | 表層用混合物 | | 基層用混合物 | |
|-----------------------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| | 密 粒 (改質 II) | 排水性 | 粗 粒 (ストアス) | 粗 粒 (改質 II) |
| マーシャル安定度 (kN) | 7.35 以上 | 3.50 以上 | 7.35 以上 | 7.35 以上 |
| 残留安定度 (%) | 75 以上 | 75 以上 | 75 以上 | 75 以上 |
| フロー値 (1/100cm) | 20~40 | - | 20~40 | 20~40 |
| 動的安定度 (回/mm) | 3000 以上 | 3000 以上 | 1000 以上 | 3000 以上 |
| 透水係数 (cm/s) | - | 10^{-2} 以上 | - | - |
| ラベリング損失量 (cm ²) | 1.3 以下 | 1.3 以下 | - | - |

密粒度舗装の表層ならびに基層の望ましい材料（選択後の後悔が最も小さい表・基層用アスファルト混合物）は、5.6 より表層は改質 II 型密粒度アスファルト混合物，基層は改質 II 型再生粗粒度アスファルト混合物とする。また，排水性舗装の基層の混合物についても密粒度舗装と同じとする。

6.4.2 試験施工候補区間の選定と事前調査

修繕を実施することが望ましい路線において，見通しが良くかつ試験施工に用いる材料以外の劣化要因が無視できる区間を選定するため，密粒度舗装ならびに排水性舗装の路線から，図-4.7 の異質性パラメータの値が1程度の下記の区間を候補地とし，舗装の構造的な劣化の有無を確認するために事前調査を実施した。事前調査項目を表-6.4 に，各調査位置を図-6.5 に示す。

密粒度舗装区間 （141.490kp～141.640kp 上り線）150m $\varepsilon^k = 1.05$

排水性舗装区間 （108.719kp～108.854kp 上り線）135m $\varepsilon^k = 0.88$

図-6.6 は，平たん性，わだち掘れ量，ひび割れ率の事前調査結果から算出した各区の MCI の値を示している。同図より，密粒度舗装区間，排水性舗装区間共に MCI の平均値は 5 未満であり，同路線の管理基準により修繕対象区間とみなされる。また，図-6.7，図-6.8

は、各区間のたわみ量の温度、荷重補正値を示している。排水性舗装区間で載荷直下のたわみ量（D0）が大きい箇所では、路面にひび割れが生じており MCI の値も小さいが、載荷位置から 150cm 離れた地点のたわみ量（D150）は 100 μ m 未満であり、路床の損傷は小さいと判断する。一方、密粒度舗装区間のたわみ量は全体的に小さく、路床の損傷は無視できると考えられる。以上の事前調査結果から、本候補地を試験施工箇所を選定した。

表-6.4 事前調査項目

| 調査項目 | 機器 | 計測数・位置 |
|--------|----------|----------|
| 平坦性 | 路面プロファイラ | 各工区 1 測線 |
| わだち掘れ量 | 同上 | 各工区 3 測線 |
| ひび割れ率 | スケッチ法 | 各工区 3 断面 |
| たわみ量 | FWD | 各工区 3 点 |

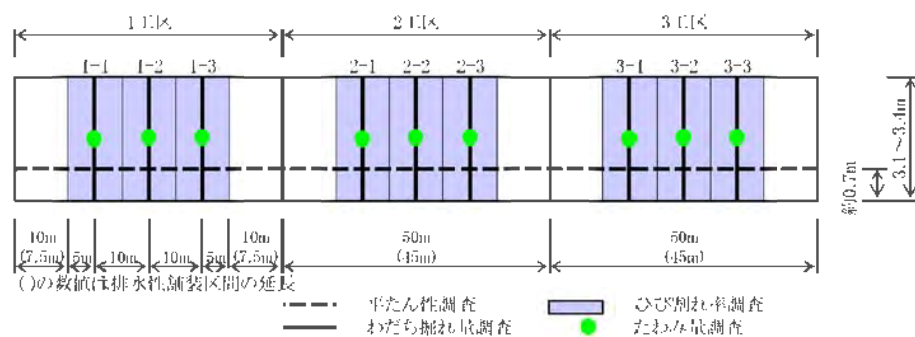


図-6.5 調査位置図

6.4.3 試験施工の概要

試験施工の目的は修繕にかかる舗装材料のベストプラクティスの選定であるが、同時に材料の経済性も評価するため、表-6.5 に示すように3つの工区を設ける。各工区において、1工区では安価で経済的と思われる混合物、2工区では実績から望ましいとされる混合物、3工区では、表-6.2、表-6.3 の基準値を満足する混合物である。なお、排水性舗装区間の表層のポーラスアスファルト混合物（ポーラスアスコン）は再生骨材の実績がないため、1、2工区共に同じ混合物とする。また、基層の混合物は密粒度舗装および排水性舗装区間共通で、3工区の基層混合物は排水性舗装用の改質 II 型粗粒度アスファルト混合物とする。既設路面の切削厚さは過去の実績に準じて 10cm、表層、基層の各舗装厚さは 5cm である。

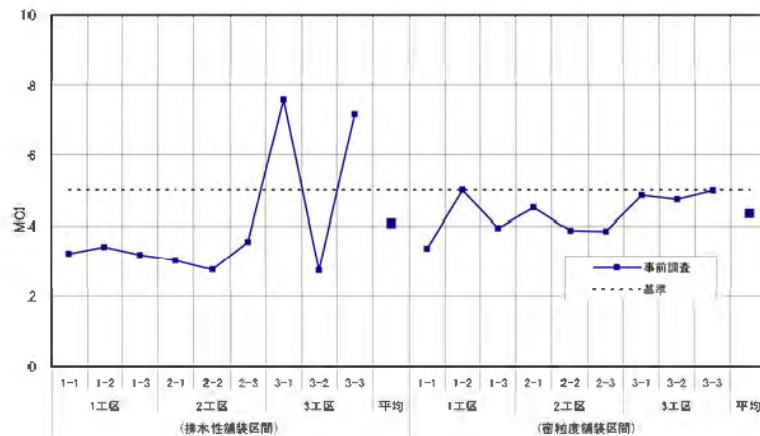


図-6.6 MCI (事前調査)

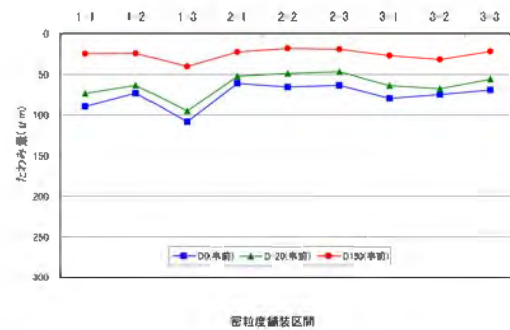
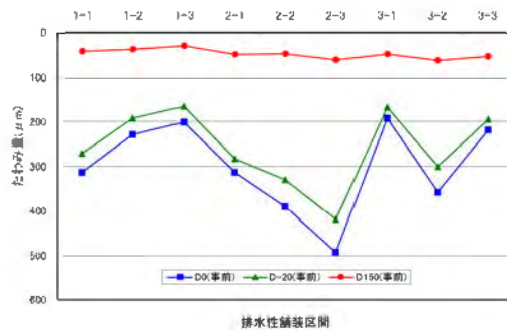


図-6.7 たわみ量 (排水性舗装：事前調査) 図-6.8 たわみ量 (密粒度舗装：事前調査)

6.4.4 追跡調査

試験施工の追跡調査は、試験施工の良否の確認ならびに各工区における修繕後の舗装のパフォーマンスの相対評価を目的として実施する。表-6.6 に試験施工後の追跡調査項目と実施時期を示す。表に示した耐水性は、現地から採取した基層の供試体を用いて行う室内試験の評価項目である。

路面性状調査

事前調査および追跡調査結果から得た各工区の MCI を図-6.9 に示す。図より、試験施工直後の第 1 回追跡調査において MCI は 9 以上に回復していることから、試験施工に問題は無いと考えられる。また、第 2 回調査では MCI が僅かに低下しており、特に排水性舗装区間で各工区の MCI に差が生じている。この原因であるわだち掘れ量の測定結果を図-6.10、

表-6.5 試験施工に適用する各工区のアスファルト混合物

| | | 1 工区 | 2 工区 | 3 工区 |
|----|-------|-----------|------------------|-----------------------|
| 表層 | (密粒) | 再生密粒度アスコン | 改質 II 型密粒度アスコン | 改質 II 型密粒度アスコン (骨材選定) |
| | (排水性) | ポーラスアスコン | ポーラスアスコン | ポーラスアスコン (骨材選定) |
| 基層 | (共通) | 再生粗粒度アスコン | 改質 II 型再生粗粒度アスコン | 改質 II 型粗粒度アスコン (骨材選定) |

表-6.6 追跡調査項目と実施時期

| 調査項目 | 第 1 回調査 | 第 2 回調査 |
|------------|---------|--------------|
| | (施工直後) | (施工後 8 ヶ月経過) |
| 平坦性 | 実施 | 実施 |
| わだち掘れ量 | 実施 | 実施 |
| ひび割れ率 | 実施 | 実施 |
| たわみ量 | 実施せず | 実施 |
| 耐水性 (室内試験) | 実施せず | 実施 |

図-6.11 に示す、第 2 回の調査結果から、排水性舗装区間では 1,2,3 工区の順でわだち掘れが大きいことが分かる。

たわみ量調査

図-6.12、図-6.13 より、第 2 回追跡調査時における排水性舗装区間のたわみ量 D0 は事前調査時と比較して小さく、ほとんどの測定位置で基準値 ($300\mu\text{m}$) を下回っている。密粒度舗装区間においても同様に追跡調査時のたわみ量は非常に小さい。一方、図-6.14 より、たわみ量とわだち掘れ量の間に明確な関係は見られず、各工区のわだち掘れの進行が舗装の耐荷力によるものか判断できない。

室内試験

第 2 回追跡調査は施工後 8 ヶ月経過した時点で実施しており、わだち掘れの進行という路面パフォーマンスの変化を材料によるものと断定することは難しい。追跡調査において路面の摩耗が生じていないことから、滞水による基層混合物のアスファルト被膜のはく離

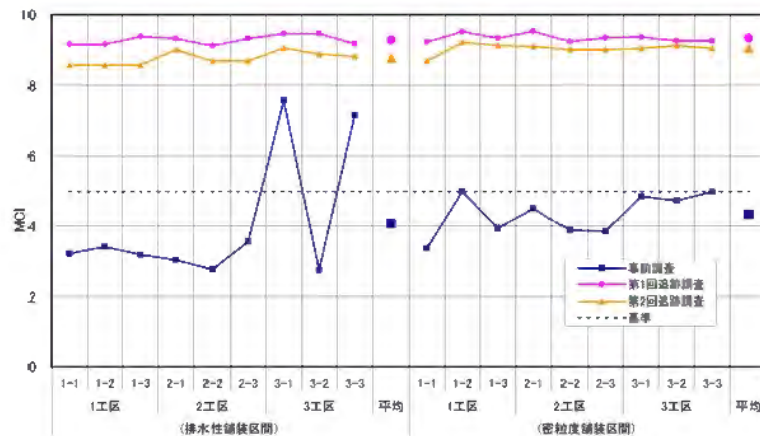


図-6.9 MCIの経時変化

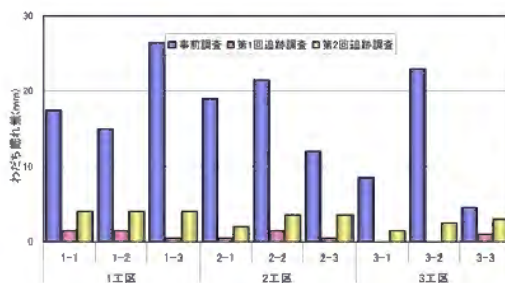


図-6.10 わだち掘れ量（排水性舗装）

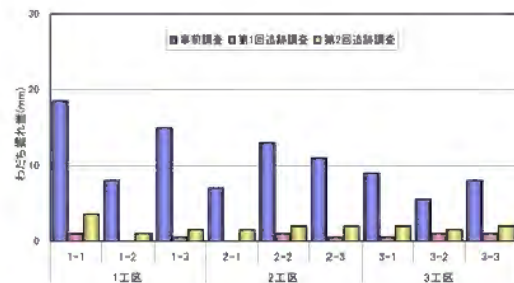


図-6.11 わだち掘れ量（密粒度舗装）

が疑われる。そこで、試験施工箇所の基層供試体を採取して室内試験を行い、耐水性を評価する。現在、アスファルト混合物の耐水性を評価する方法として、水浸ホイールトラッキング試験、加圧式はく離促進試験、水浸マーシャル安定度試験、修正ロットマン試験がある。当該地域における冬季の厳しい気象条件に配慮して、試験に凍結融解のプロセスを有する修正ロットマン試験を採用した。本試験のフローを図-6.15に示す。

図-6.16は、各工区から採取した基層供試体の空隙率と圧裂強度の関係を示している。なお、グラフの凡例は、舗装の種類（排：排水性舗装，密：密粒度舗装），工区（1～3）と修

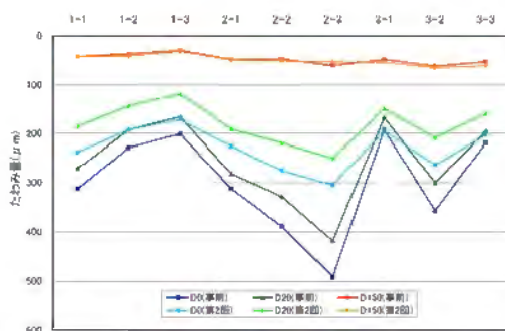


図-6.12 たわみ量（排水性舗装：追跡調査）

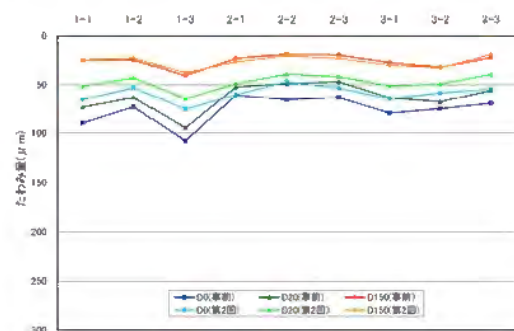


図-6.13 たわみ量（密粒度舗装：追跡調査）

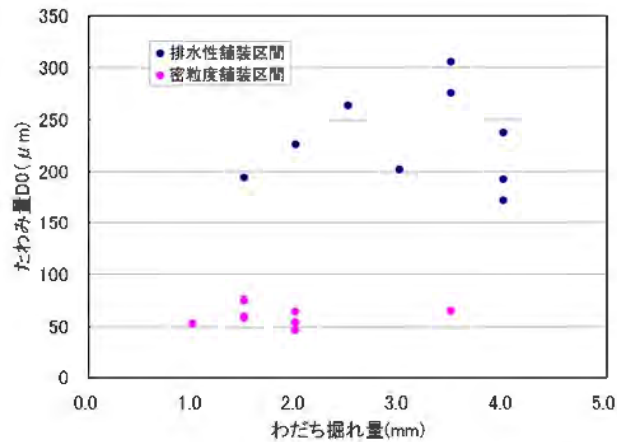


図-6.14 わだち掘れ量とたわみ量の関係

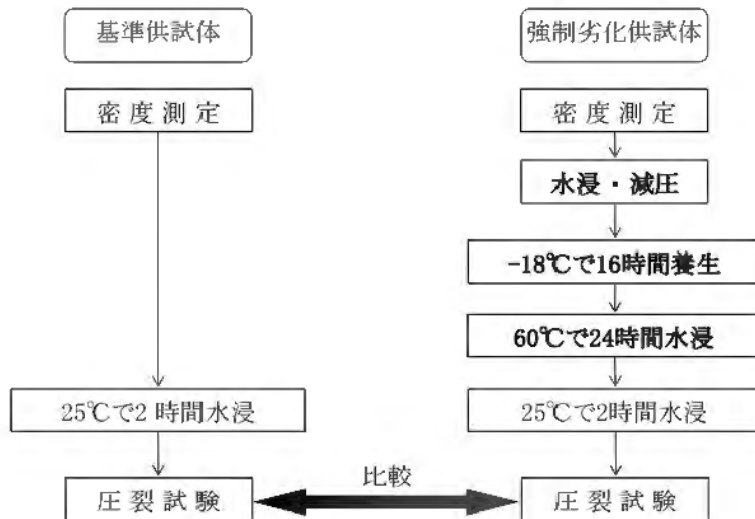


図-6.15 修正ロットマン試験のフロー

正ロットマン試験における強制劣化の有無 {1: 有り (強制劣化), 2: 無し (標準)} を表している。修正ロットマン試験は、強制劣化の過程を経た供試体と標準供試体の圧裂強度の比と供試体の空隙率の関係から基層のはく離の危険性を評価するものである。東らの研究⁹²⁾では、供試体の空隙率と圧裂強度比を用いた危険領域の判定方法が提案されているが、同研究では凍結融解のプロセスが無いため本試験には適用できない。標準供試体の圧裂強度で判定すると、図-6.16 に示すように密粒度舗装区間の3工区を除く標準供試体全て基準線を下回っており、半数以上の工区で危険と判定され、追跡調査結果と矛盾が生じる。そこで、藤田ら⁹³⁾が提唱するはく離率による評価を実施した。はく離率の算定にあたっては、圧裂試験後の供試体断面のデジタル画像を2値化 (黒:骨材のアスファルト被膜有り, 白:

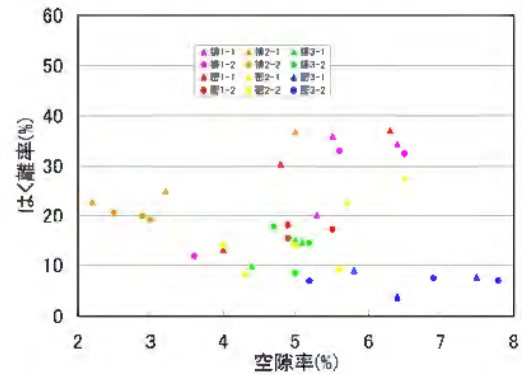
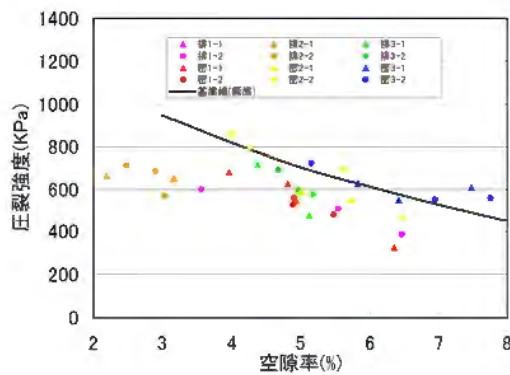


図-6.16 供試体の空隙率と圧裂強度の関係 図-6.17 供試体の空隙率とはく離率の関係

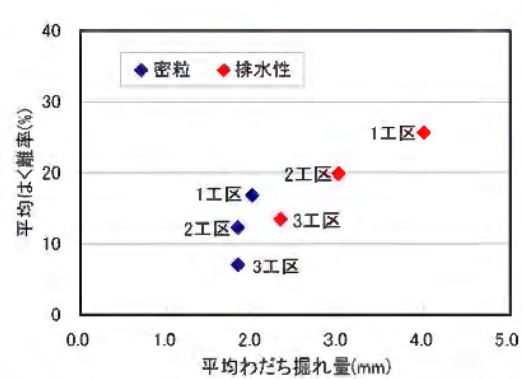
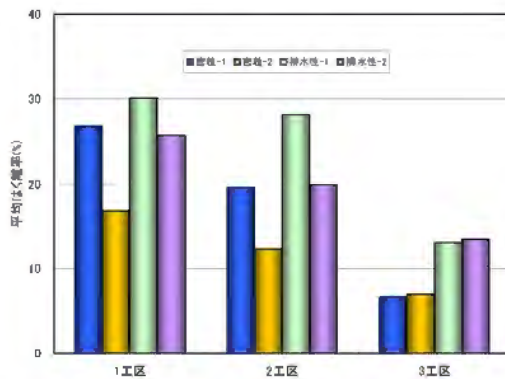


図-6.18 強制劣化の有無とはく離率の関係 図-6.19 わだち掘れ量とはく離率の関係

骨材のアスファルト被膜無し)して、供試体全断面の黒色ピクセル数と白色ピクセル数の総和に対する白色ピクセル数の比ではく離率を導出した。図-6.17より、はく離率と供試体の空隙率に明確な関係は無いが、図-6.18の工区別のはく離率をみると、1,2,3工区の順で標準、強制劣化供試体共にはく離率が小さくなる傾向が見られる。また、1,2工区から採取した供試体は強制劣化後にはく離率が上昇しているが、3工区の供試体は劣化前後のはく離率の差は小さく、強制劣化の影響をほとんど受けていないと考えられる。

標準供試体の平均はく離率と供試体を採取した各工区の平均わだち掘れ量の関係を図-6.19に示す。図より、密粒度舗装区間の基層の平均はく離率は、排水性舗装区間と比較して低く、わだち掘れ量も小さい。一方、排水性舗装区間では、わだち掘れ量の大きい工区から採取した供試体のはく離率が高い。また、いずれの区間でも、今回選定した新しい基層混合物のはく離率は小さく、試験施工箇所においてもわだち掘れ量は小さく、同混合物による耐久性向上の効果が期待できる。

6.5 本章の考察

舗装の修繕後の路面が早期に破損する原因は地域によって異なる。早期破損を防ぐためには、地域特有の問題点を抽出し、改善すべき対象を明らかにし、さらに問題解決につながる改善策を示し、過去の事例も参考にしながら当該地域におけるベストプラクティスを見出すことが重要である。本章では、修繕に用いる舗装材料に着目して、材料に起因する問題の抽出とその改善を繰り返すことにより舗装材料の継続的な改善を実現するための方法論を示した。実証分析では、4章で判明した構造的な劣化の可能性が小さい区間から修繕の試験施工箇所を選定し、5章の選択モデルで選択した望ましい材料等を用いて修繕の試験施工を実施し、追跡調査で各区の舗装のパフォーマンスを評価し、これらの変化の原因を究明するために試験施工箇所から供試体を採取し、室内試験で検証した。

試験施工の利点は、(試験施工という限定された条件ではあるが)材料以外の劣化要因が限定されるため、複数の材料の性能を比較的に高い精度で相対評価できること、新しい材料の導入可否を事前に確認できることにある。一方、試験施工を実施する場合、修繕が必要な箇所を試験施工場所に選定しても追加コストが発生すること、相対評価の目的を明確にせずに工法や材料を選定すると、試験施工の効果が期待通りに得られないことに留意しなければならない。今回の試験施工の追跡調査において、排水性舗装区間では材料に起因すると思われるわだち掘れが僅かに進行していることを確認し、室内試験においては離面積率とわだち掘れ量に関係があることが判明した。一連の調査結果から、密粒度舗装区間では材料(混合物)の違いによるパフォーマンスに大きな変化が見られないものの、排水性舗装区間では基層の材料の違いが路面の変化に影響しており、その中で新しい材料の耐久性向上の効果が期待できることが室内試験からも明らかになった。こうしたことから、本章で示した社会実験の方法論は材料の相対評価やベストプラクティスの選定に有用であると考えられる。とはいえ、短期間の調査で長期的なパフォーマンスの変化を推定することは困難であり、材料基準の改定の判断を下すためには今後も継続的に調査を実施する必要がある。

第7章 結論

7.1 各章の結論

道路の舗装は、泥はねや粉塵等による環境負荷の低減、走行性の向上など生活環境の改善や経済活動における人やモノの移動に大きく貢献してきた。舗装が有するこれらの機能は永遠に持続するものではなく、交通荷重や天候の影響を受けて低下するため、適切な維持管理を行い、その機能を回復させなければならない。近年、舗装を資産として捉え、効率的な維持管理を実施して舗装に求められるアウトカムを達成する舗装のアセットマネジメント手法が多くの自治体等で取り入れられている。一方、1990年代以降、長引く不況により建設投資が縮減されている中で、従来のアセットマネジメント手法を採用しても、今後、現況の管理水準で維持することは難しく、生活環境や経済活動へ深刻な影響を及ぼすことが懸念される。1章では、舗装の維持管理の考え方の理解を深めるため、舗装の維持管理と関連する法律や省令ならびに舗装の構造に関する技術基準について示し、舗装の維持管理に係る業務内容を整理した。

2章では、舗装のサービス指標と管理指標の相違について述べると共に、舗装の性能の評価例を示した。また、我が国でアセットマネジメント手法が取り入れられた背景として、道路の維持管理に十分な予算を投入することができずに1980年代前半に老朽化した道路橋の落橋事故が多発して経済に大きな影響を与えたいわゆる“荒廃するアメリカ”と同じ状況が日本で生じてきたことを指摘した。さらに、舗装アセットマネジメントを実践する目的は道路利用者へのアカウントビリティを果たすことであり、そのためにはアセットマネジメントを経済学、経営学、会計学を融合した総合化技術と捉える必要があること、舗装の資産としての寿命の長さ故に空間的、時間的な繋がりに配慮した階層的なマネジメントサイクルが必要であることを述べた。同時に、荒廃するアメリカの時代に関与された舗装マネジメントシステムPMSの概要と同システムのネットワークレベルとプロジェクトレベルのマネジメントの実施事項について触れ、システムを運用する上での役割分担、システムの汎用性、システムに対する理解等、舗装マネジメントシステムの課題を示した。また、2年後に発効予定のアセットマネジメント国際規格ISO5500Xの要求事項や舗装マネジメントシステムの課題を踏まえて、舗装技術の継続的改善の必要性について言及し、日

常的な維持と定期的な実施される修繕を対象として、これにかかる舗装技術の継続的な改善を実現するための方法論を本研究で提案することを示した。

3章では、日常的な舗装の維持の大半を占めるポットホールの補修に着目し、同補修箇所の耐久性向上に寄与する方法論を提案した。まず、ポットホールの補修に用いる補修用常温アスファルト混合物の適性を評価するための室内試験と試験条件を設定した。また、ポットホール補修箇所でポットホールが再度発生した状態を補修箇所の寿命とみなし、補修箇所の生存確率をワイブル劣化ハザードモデルを用いて推計する手法を示した。さらに、モデルの推計に必要な点検項目を設定した。実証分析では、複数の常温アスファルト混合物を用いて室内試験を実施し、混合物の適性を示すと共に、ポットホール点検記録データにワイブル劣化ハザードモデルを適用し、モデルの推計結果から補修箇所の早期破損の原因を明らかにした。

室内試験結果と現道の点検記録データを用いたハザードモデルの推計結果には幾つかの相違点が存在する。例えば、室内試験では混合物の種類で物理性状に明確な違いがあることが判明したが、現道においては混合物による生存確率の違いの有意性は得られていない。現道では、補修時の水の有無、繰り返し補修回数など、室内試験でコントロールできない条件が存在し、これが生存確率に影響している。本結果は、水が耐久性向上に寄与するような材料（例えば水を硬化触媒とする材料）が求められること、繰り返しポットホールが発生する箇所では既設の舗装に何らかの問題があり、別の補修方法を検討することが望ましいことを示唆するものである。一方、室内試験の知見を踏まえて混合物を保温保管した結果、現道の補修箇所で長期間生存した事例も得た。室内試験による常温混合物の相対評価、現道の補修へ適用と問題点の抽出、問題を改善した新しい混合物の開発と室内試験という過程を繰り返すことが、維持にかかる舗装技術の継続的な改善に寄与することを本章で述べた。

4章以降では、舗装の修繕を対象とした舗装技術の改善の方法論を提案した。舗装の構造的な耐荷力が低下している区間では、舗装構造、交通条件、環境条件が同一であっても修繕後の劣化速度は相対的に大きい。修繕後の路面の早期破損を防ぐためには、構造的な損傷の程度を事前に把握し、損傷状況に応じて修繕工法や材料を選択することが求められる。一方、舗装の維持管理費用の縮減が進む中で、構造調査の費用を確保することは難しい。4章では、混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて路面の劣化過程を表現し、同じ舗装構造を有するグループ間の劣化速度の異質性を相対評価することにより構造的な劣化が

疑われる重点管理区間を効率的に抽出する手法を提案した。実証分析では、対象地域の路面性状データと舗装台帳データを融合したデータベースを用いてモデルの推計を行い、推計結果から得た重点管理区間と標準的な区間でたわみ量調査を実施した。その結果、重点管理区間でたわみ量が大きい地点が多く存在することが判明し、少なくとも実証分析を実施した路線において、本手法が構造的な損傷箇所の抽出に有効であることを示した。また、たわみ量の大きい箇所では表層のみの切削オーバーレイが繰り返されていることから、修繕履歴の情報を活用して修繕計画を見直すことが今後の舗装維持管理において重要であることを述べた。

舗装の構造的な損傷の程度が判明して修繕工法が決定した後、道路管理者は修繕に使用するアスファルト混合物や路盤材などの舗装材料を選択する。道路管理者はこれらの材料を複数の選択肢からランダムに決定するのではなく、修繕箇所の様々な条件に配慮し、過去の修繕履歴の情報や管理者自身の知見を踏まえて選択する。5章では、舗装材料の選択の際に参照する修繕履歴の情報やこれに基づく知見が不完全なものであることを示し、不完全な情報に基づいて望ましい材料を選択するための方法論を提案した。ここでは、修繕に用いる望ましい材料を“地域特有の舗装の劣化要因とその対策を鑑みて、耐久性が高いと認められる安価かつ将来にわたって調達可能なもの”と定義した。また、混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて材料固有の劣化特性を異質性で評価する手法を示した。さらに、同モデルを適用しても依然として選択されない材料に関する情報の不確実さが存在すること、表・基層各層の材料が互いに共変量となることを考慮し、共変量による条件付き生存確率のとりうる範囲から、最も選択ミスによる後悔が少ない材料を選択するモデルを構築した。4章と同じ路線のデータで検証した事例研究では、密粒度舗装区間の表・基層混合物を対象としてハザードモデルを推計し、選択モデルを適用した。その結果、表層は改質Ⅱ型密粒度アスファルト混合物、基層は改質Ⅱ型再生粗粒度アスファルト混合物が望ましい材料であることを示した。

修繕に関する4章、5章の方法論は、従来技術のベンチマーキングに他ならない。劣化速度の異質性が高い区間を改善することや望ましい材料の選択機会を増やすことは、相対的に劣化が早い問題箇所を平均レベルに近づけることを意味しており、改善の要素が無くなれば以降の効果は期待できない。一方、改善の手段として新しい舗装技術を導入しても、コストに見合う効果が得られる保証は無い。6章では、修繕に用いる新しい材料の導入効果を社会実験的に評価し、これを踏まえて材料基準を改善するための方法論を提案した。具

体的には、道路管理者が解決すべき問題を明らかにし、問題解決につながる新しい舗装材料を開発あるいは選定し、試験的に導入してその効果を検証し、新たな材料の導入を促進するために管理基準の見直しをするというプロセス及びこれを実践するために必要な事項を示した。実証分析では、本研究の対象地域において冬季における積雪時のタイヤチェーンによる路面の磨耗、夏季の路面温度上昇や路面の滞水に起因する流動わだちの発生が対象地域の舗装路面の早期破損の主な原因であり、舗装の維持管理上最も大きな問題であることを示した。そこで、材料の観点から同問題を解決するため、同じ問題を抱えている他の積雪地域の材料基準を参照して舗装材料の新しい基準を設定した。さらに、同基準を満足する新しい材料や既存の望ましい材料、経済的な材料を用いて修繕の試験施工を社会実験的に実施し、追跡調査や現地から採取した供試体を用いた室内試験で各材料の相対評価を行った。修繕後の経過時間が短いため、新しい材料の導入効果の検証は十分とは言い難いが、わだち掘れやはく離面積率で明確な違いが存在すること、これらの間に相関が見られることから、新しい材料に耐久性向上の効果が期待できることを示した。

7.2 結語

本研究では、舗装アセットマネジメントの階層的なマネジメントサイクル自体を継続的に改善する上位のマネジメントすなわちメタマネジメントを実践するための方法論を示したものである。提案した方法論の有用性を検証するために舗装の点検記録や路面性状データ、舗装台帳データを活用しているが、これは既存のデータや情報が無ければ改善できないことを意味するものではない。本研究では、舗装の維持管理の問題や今後解決すべき課題を明らかにし、その解決のために必要な情報を収集し、分析を進める過程で舗装材料の継続的な改善を実現するプロセスを重視している。また、実証分析では維持管理手法の改善のあるべき方向性を示唆しているが、マネジメントの意志決定に係る具体的な内容について詳細には触れていない。地域固有の実情があるため、全ての地域で同一の意志決定を行うことはできない。マネジメントを実践するための最終的な意志決定は、問題に直面している道路管理者自ら行わなければならないのである。本研究が、その一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 多田宏行：新編，語り継ぐ舗装技術，鹿島出版会，2011.
- 2) 国土交通省：道路統計年報 2010 年版，全国道路利用者会議，2011.
- 3) 土木学会土構造物および基礎委員会「舗装工学」編集委員会：舗装工学，丸善，1995.
- 4) 社団法人 日本道路協会：舗装設計施工指針（平成 18 年版），丸善，2006.
- 5) 社団法人 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説，丸善，2001.
- 6) 社団法人 土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦，技報堂出版，2005.
- 7) 占田均，安田敬一，川谷充朗，竹林幹雄：社会資本アセットマネジメント，森北出版，2010.
- 8) 小澤隆：道路維持管理の現状と課題，リファレンス，国立国会図書館調査及び立法考査局，No.675，pp53-70，2007.
- 9) 佐藤信彦，小坂寛巳，奥平真誠：舗装の維持修繕，建設図書，1992.
- 10) 国土交通省：平成 21 年度国土交通白書，2010.
- 11) 山本幸司：わが国の社会資本整備と建設関連産業を取り巻く現状と課題，総研リポート第 4 号，財団法人 建設物価調査会総合研究所，2010.
- 12) R.Haas：Future Prospects for Pavement Management, *The 11th International Conference on Asphalt Pavements*, 2010.
- 13) 阿部頼政：舗装管理システムに関する研究の動向，土木学会論文集，第 372 号/V-5，pp.17-27，1986.
- 14) 藤井治嘉：道路舗装の維持管理，土木学会論文集，No.366，pp.13-26，1986.
- 15) 社団法人 日本道路協会 道路維持修繕委員会：道路資産管理の手引き，2008.

- 16) 舗装機能の評価に関する研究小委員会：舗装機能の評価技術の現状と将来，土木学会論文集 No.472/V-20，pp.13-28，1993.
- 17) 高橋国一郎，多田宏行，松野三郎，柳田力，萩原浩，福田正，岩間滋 訳：AASHO 道路試験，社団法人日本セメント技術協会，1966.
- 18) 飯島尚，今井博，猪股和義：MCI による舗装の供用性の評価，土木技術資料 23-11，pp.15-20，1981.
- 19) 社団法人 日本道路協会：道路維持修繕要綱，丸善，1978.
- 20) 藪雅行：舗装の管理目標 -諸外国における管理目標の実態とこれを踏まえた管理目標の概念整理-，舗装，Vol.40，No.7，pp.11-14，建設図書，2005.
- 21) 土木学会舗装工学会委員会：舗装工学ライブラリー 2 FWD および小型 FWD 運用の手引き，丸善，2002.
- 22) 社団法人日本道路協会：舗装性能評価法 -必須および主要な性能指標の評価法編-，丸善，2006.
- 23) 国土交通省：平成 18 年度国土交通白書，2007.
- 24) 国土交通省道路局：「道路構造物の今後の維持・更新等のあり方」に関する提言，2003.
- 25) P.Choate and S.Walter 著/米国州計画機関評議会編：荒廃するアメリカ，建設行政出版センター，1982.
- 26) 小林潔司：アセットマネジメント研究のフロンティア，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.11-13，2003.
- 27) 小林潔司，上田孝行：インフラストラクチャ・マネジメントの研究の課題と展望，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.15-27，2003.
- 28) 貝平清之，青木一也，小林潔司：実践的アセットマネジメントと第 2 世代研究への展望，土木技術者実践論文集，Vol.1，pp.67-82，2010.
- 29) 北海道土木技術会舗装研究委員会：舗装マネジメントシステム (PMS) 入門，2002.
- 30) R.Hass and Hutchinson,B.G. : A Management System for Highway Pavements, *Proceedings of Australian Roads Research Board*, 1970.

- 31) 笠原篤:研究展望 舗装マネジメントシステム, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.1-12, 1993.
- 32) 菊川滋:日本の道路網への舗装管理システム(PMS)の適用について, 道路, pp.64-67, 1985.
- 33) R.Haas and W.R.Hudson/北海道上木技術会 舗装研究委員会 訳:舗装マネジメントシステム, 共同印刷, 1989.
- 34) R.Haas,W.R.Hudson and J.Zaniewski/北海道上木技術会 舗装研究委員会 訳:最新舗装マネジメント, 須田製版, 2000.
- 35) 角川浩二:最適制御モデルを用いた道路修繕ライフ・サイクル費用の最小化 解法とその評価, 土木学会論文集, No.397/VI-9, pp.59-66, 1988.
- 36) 谷口聡, 吉田武:舗装工事におけるプロジェクトレベルのLCC算定法に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第7巻, pp.175-184, 2002.
- 37) 谷口聡, 伊藤正秀, 野村敏明, 阿部忠行:舗装データベースを用いた供用性曲線作成手法に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第8巻, pp.99-106, 2003.
- 38) 内田賢悦, 加賀屋誠一:積雪寒冷地における冬期の道路交通状況を考慮した道路舗装のLCC評価に関する研究, 土木学会論文集D, Vol.62, No.3, pp483-495, 2006.
- 39) 笠原篤:舗装マネジメントシステムからアセットマネジメントシステムへ, 土木学会舗装工学論文集, 第10巻, pp.K1-K4, 2005.
- 40) 小澤一雅:社会資本におけるアセットマネジメントの導入, 舗装, Vol.40, No.7, pp.7-10, 建設図書, 2005.
- 41) 上杉直樹, 関 太一, 末廣良和, 永瀬一典, 遠藤 桂:横浜市の舗装のアセットマネジメントシステム導入に向けた諸検討, 土木学会舗装工学論文集, 第11巻, pp.139-146, 2006.
- 42) 坂井康人, 上塚晴彦, 小林潔司:ロジックモデル(HELM)に基づく高速道路維持管理業務のリスク最適化, 建設マネジメント研究論文集, Vol.14, pp.125-134, 2007.

- 43) 福田隆之：イギリスにおけるインフラファンドの発展と日本への示唆，NRI パブリックマネジメントレビュー，Vol.61，2008.
- 44) 青木一也，小田宏一，児玉英二，貝戸清之，小林潔司：ロジックモデルを用いた舗装長寿命化のベンチマーキング評価，土木技術者実践論文集，Vol.1，pp.40-52，2010.
- 45) 森見俊明：舗装における取り組み，土木学会関東支部講習会 地方自治体のアセットマネジメント -社会資本の大量更新時代の到来に向けて-，社団法人 土木学会関東支部編，2008.
- 46) 峰岸順一，竹田敏憲：低騒音舗装のポットホールに使用する高性能型常温混合物の評価，土木学会舗装工学論文集，第 12 巻，pp.131-139，2007.
- 47) 社団法人 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧〔第 3 分冊〕，丸善，2007.
- 48) 永田佳文，田中大介：首都高速道路における緊急補修材料の試験施工，舗装，Vol.47 No.2，pp.7-12，2012.
- 49) 鎌田修，山田優：水浸ホイールトラッキング実験による橋面舗装でのポットホールの発生とその要因，土木学会舗装工学論文集，第 6 巻，pp.203-208，2001.
- 50) H.C.Shin and S.M.Madanat：Development of stochastic model of pavement distress initiation, *Journal of Infrastructure Planning and Management*, No.744/IV-61, pp.61-67, 2003.
- 51) 青木一也，山本浩司，小林潔司：劣化予測のためのハザードモデルの推計，土木学会論文集，No.791/VI-67，pp.111-124，2005.
- 52) 貝戸清之，山本浩司，小濱健吾，岡田貢一，小林潔司：ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル：大規模情報システムへの適用，土木学会論文集 F，Vol.64，No.2，pp.115-129，2008.
- 53) 津田尚胤，貝戸清之，山本浩司，小林潔司：ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法，土木学会論文集 F，Vol. 62，No. 3，pp.473-491，2006.
- 54) 坂元慶行，石黒貞木夫，北川源四郎：情報量統計学，共立出版，1983.
- 55) 磯田和男，大野豊：数値計算ハンドブック，オーム社，1990.

- 56) 森棟公夫：計量経済学，東洋経済新報社，1999.
- 57) 岩田暁一：計量経済学，有斐閣，1982.
- 58) 藤原栄吾，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司，沢田康夫：積雪寒冷地におけるポットホール補修合材の耐久性分析，建設マネジメント論文集，Vol.15，pp.239-248，2008.
- 59) 青木一也，福島和也，永尾辰巳，岡田貞一，窪田智則：舗装の補修後の劣化速度を考慮した工法選定，土木計画学研究・講演集，Vol.44，No.193，2011.
- 60) R.G.Mishalani and S.M.Madanat：Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models, *ASCE, Journal of Infrastructure Systems*, Vol.8, No.4, 2002.
- 61) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.68-82，2005.
- 62) 青木一也，山本浩司，津田尚胤，小林潔司：多段階ワイブル劣化ハザードモデル，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.125-136，2005.
- 63) 貝戸清之，熊田一彦，林秀和，小林潔司：階層型指数劣化ハザードモデルによる舗装ひび割れ過程のモデル化，土木学会論文集 F，Vol.63，pp.386-402，2007.
- 64) 林秀和，貝戸清之，熊田一彦，小林潔司：競合的劣化ハザードモデル：舗装ひび割れ過程への適用，土木学会論文集 D，Vol.65，No.2，pp.143-162，2009.
- 65) 小林潔司，貝戸清之，林秀和：測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル，土木学会論文集 D，Vol.64，No.3，pp.493-512，2008.
- 66) 小濱健吾，岡田貞一，貝戸清之，小林潔司：劣化ハザード率評価とベンチマーキング，土木学会論文集 A，Vol.64，No.4，pp.857-874，2008.
- 67) 加納孝志，岩永真和，大場拓也，塚越智浩，永島直紀，森嶋洋幸：「移動式たわみ測定装置」について，アスファルト，Vol.51，No.224，2008.
- 68) 中村俊行，伊佐真秋：新基準調査結果報告 初期調査編（調査要領），土木研究所資料第 3157 号，1993.

- 69) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之: 舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.107-114, 1990.
- 70) 土木学会舗装工学委員会: 舗装工学ライブラリー 3 多層弾性理論による舗装構造解析入門, 丸善, 2005.
- 71) 亀山修一, 姫野賢治, 丸山暉彦, 笠原篤: 遺伝的アルゴリズムを用いた舗装体の弾性係数の逆解析, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.195-204, 1996.
- 72) 阿部長門, 丸山暉彦, 姫野賢治, 林正則: たわみ評価指標に基づく構造評価, 土木学会論文集 No.460/V-18, pp.41-48, 1993.
- 73) 神谷恵三, 風戸崇之: 高速道路舗装の損傷評価方法に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第 13 巻, pp.171-178, 2008.
- 74) 丸山暉彦, 阿部長門, 雑賀義夫, 姫野賢治: FWD による舗装の構造評価および補修設計システムの開発, 土木学会論文集, No.484/V-22, pp.61-68, 1994.
- 75) 社団法人 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧 [第 1 分冊], 丸善, 2007.
- 76) 小林潔司, 江口利幸, 大井明, 青木一也, 貝戸清之: 劣化過程の不確実性を考慮した路面性状調査の最適実施方策, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.67, No.2, pp.75-90, 2011.
- 77) 南雲貞夫, 川原伸孝, 谷本誠一: アスファルト混合物の配合設計, 材料に関する幕張試験舗装および室内試験による研究, 土木研究所資料, 第 923 号, pp.107-128, 1973.
- 78) 小田桐直幸, 田中徹夫, 山崎泰生: 高架橋上アスファルト舗装のわだち掘れ予測, 道路建設, No.466, pp.70-78, 1986.
- 79) 伊藤豪誠, 近藤陽, 池田拓哉: アスファルト混合物の動的安定度の目標値設定方法の提案, 土木技術資料, Vol.31, No.1, pp.30-35, 1989.
- 80) 羽入昭吉: 超重交通道路用高品質アスファルトの性質, 舗装, Vol.31, No.12, pp.7-9, 建設図書, 1996.
- 81) 岩崎学: 不完全データの統計解析, エコノミスト社, 2002.

- 82) J.Tobin: Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables, *Econometrica*, Vol.26, pp.24-36.1958.
- 83) J.J.Heckman : Shadow Prices, Market Wages, and Labor Supply, *Econometrica*, Vol.42, pp.679-694.1974.
- 84) C.F.Manski: *Social Choice with Partial Knowledge of Treatment Response*, Princeton University Press, 2005.
- 85) 星野崇宏：調査観察データの統計科学，岩波書店，2009.
- 86) 社団法人 日本道路協会：舗装再生便覧（平成 22 年版），丸善，2010.
- 87) 鎌田修，藤井政人，久保利幸：排水性舗装の側方流動の発生要因と対応策に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 11 巻，pp.99-105，2006.
- 88) 紺野路登，水野孝浩，中塚将志，関口峰：簡易な路上表層再生機を用いた補修工法の開発と効果の検証，道路建設，No.728，pp.50-56，2011.
- 89) 伊藤春彦，水野渉，本間悟，浅野耕司：遮水型排水性舗装工法への取組み，舗装，Vol.43，No.6，pp.13-18，建設図書，2008.
- 90) 国土技術研究センター：社会実験事例集 道路施策の新しい進め方，大成出版社，2003.
- 91) 高橋洋二，久保田尚：鎌倉の交通社会実験，勁草書房，2004.
- 92) 東滋夫，篠塚政則，坂本健次，金井俊浩：アスファルト混合物のはく離抵抗性評価方法に関する研究，道路建設，No.632，pp.32-38，2004.
- 93) Y.Fujita, H.Fujii and T.Kojima : Evaluation Method for Moisture-Induced Damage of Binder Course Mixtures under Porous Asphalt Pavements, Including Digital Image Analysis, *The 11th International Conference on Asphalt Pavements*, 2010.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ご指導、ご協力賜りました多くの方々に心より感謝の意を表します。

まず、京都大学 小林潔司教授には、本研究の方針、内容に関して、終始、親切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。舗装の維持管理手法の研究・開発に本格的に取り組み始めた5年前、舗装をいかに効率的・効果的に管理するかという問題意識を持っていた筆者は、舗装のみならず土木施設のアセットマネジメントの先進的な研究をされている小林潔司教授のもとを訪れました。縁あって、統計的劣化予測手法に基づいた舗装の維持管理、舗装の新技術を効果的に取り入れるためのマネジメントの方法論等、広範囲にわたって筆者をご指導いただきました。マネジメントの方法論や要素技術のみならず、アセットマネジメントの本来の目的や考え方について諭していただいたことは、筆者にとって大きな財産となりました。

京都大学 大津宏康教授、河野広隆教授には、本論文の取りまとめに関して、適切なご助言・ご指導をいただきました。ここに、深く感謝いたします。

大阪大学 貝戸清之准教授には、本研究にあたり、ワイブル劣化ハザードモデル、混合マルコフ劣化ハザードモデル等の統計的劣化予測手法に関して細部にわたりご指導をいただきました。また、新都市社会技術融合創造研究会「積雪寒冷地における舗装の耐久性向上及び補修に関する研究」プロジェクトにおいて、研究成果のとりまとめや報告において、多くのご支援をいただきました。ここに、心より感謝いたします。

本論文は、新都市社会技術融合創造研究会の研究プロジェクトで小林潔司教授がプロジェクトリーダーを務められた「積雪寒冷地における舗装の耐久性向上及び補修に関する研究」の研究成果が根幹となっております。プロジェクトの遂行にあたり、大阪市立大学 山田優名誉教授ならびに近畿地方整備局、舗装関連会社のメンバー各位には、多大なるご支援、ご協力をいただきました。特に株式会社玉井道路の香川保徳技術顧問（前大林道路株式会社大阪支店エンジニアリング部長）には、同プロジェクトを遂行するために技術的なご支援、ご助言をいただきました。ここに、心より御礼申し上げます。

舗装アセットマネジメントに関する問題意識と研究願望は、筆者が在籍する大林道路株式会社での業務において培われてきたものです。筆者を在職のまま京都大学大学院博士後期課程に入学することを承諾し、物心両面でご支援をいただいた石井哲夫社長、小林潔司

教授への取り計らいや在学中に多くのご助言をいただいた梶太郎常務と庄野豊顧問，大学での研究をサポートするために尽力いただいた東洋テックス株式会社 高橋哲躬専務（前大林道路技術研究所長）ならびに大林道路株式会社本店エンジニアリング部，同技術研究所の関係者に心より感謝いたします。

京都大学 松島格也准教授，大西正光助教，吉田護 GCOE 特定助教には，研究の進め方をはじめとして親切丁寧にご指導いただき筆者の研究活動を支援していただきました。京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻計画マネジメント論研究室の諸兄には，本研究を取りまとめる上でご支援を頂きました。株式会社パスコの岡田貢一氏，森悠氏には，MBA 過程に在学されている間や復職された後も前述の研究プロジェクトにおいて多くの面でご協力をいただきました。また，秘書の藤本彩氏には，研究活動を進める上で，各種手続き等様々な面でご支援いただきました。ここに，厚く御礼申し上げます。

最後に，常に筆者の研究活動を陰ながら支えてくれた妻と息子に感謝します。

2012 年 7 月

藤原 栄吾